

DIRETRIZES BIOCLIMÁTICAS DE APOIO AO PROJETO PARA OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES ECONÓMICAS EM ADOBE NO CEARÁ - BRASIL

LEVI TEIXEIRA PINHEIRO

PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA CIVIL

ABRIL DE 2023

DIRETRIZES BIOCLIMÁTICAS DE APOIO AO PROJETO PARA OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES ECONÓMICAS EM ADOBE NO CEARÁ NO BRASIL

LEVI TEIXEIRA PINHEIRO

Tese submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de **DOUTOR EM ENGENHARIA
CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS**

Orientador: Professora Doutora Bárbara Rangel Carvalho

Coorientador: Professora Doutora Ana Sofia Guimarães

Coorientador: Professor Doutor Humberto Salazar Varum

ABRIL DE 2023

PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 2139

✉ prodec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Programa Doutoral em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao universo e seus encantos e a minha linda família: minha filha, meus pais e irmãos.

Houve um tempo em que Olorum encarregou Oxalá de fazer o mundo, e modelar o ser humano.

Assim, o orixá Oxalá tentou vários caminhos.

Tentou fazer o ser humano de ar, à sua semelhança. Não deu certo, pois o ser logo desvaneceu.

Oxalá tentou então fazer de pau, mas a criatura ficou dura e inerte.

Tentou também de pedra, mas foi uma tentativa ainda pior.

Fez de fogo e o ser humano consumiu-se.

Tentou azeite, água, e até vinho de palma; e nada!

Foi então que Nanã veio em seu socorro.

Ela deu a Oxalá o barro do fundo da lagoa onde ela morava, a lama sob suas águas; que representam a própria orixá Nanã.

Assim finalmente; Oxalá conseguiu criar o ser humano, pois o modelou no barro de Nanã.

E com o sopro de vida de Olorum, o ser humano caminhou.

Com a ajuda dos Orixás, os seres humanos povoaram a terra.

Mas um dia eles têm que morrer.

O corpo do ser humano tem que voltar à terra, e retornar à natureza do barro de Nanã.

A grande mãe da humanidade, Nanã, que deu a matéria prima na criação da vida, quer de volta no final tudo o que é seu!

Assim seus filhos retornam inevitavelmente ao barro de onde vieram.

Mito Iroubá

Catalogado por Reginaldo Prandi

AGRADECIMENTOS

Ao findar desta tese, gostaria de agradecer as forças do universo e ao destino por colocarem pessoas lindas no meu caminho. Inicialmente agradeço ao professor Adeildo Cabral, que apresentou aos professores Bárbara Rangel, Humberto Varum e Ana Sofia, tornando o sonho de pesquisar sobre construção em terra possível. Além, da sua contribuição fundamental como parceiro de pesquisa, compartilhando o seu conhecimento e os de instrumentos de monitoramento térmico do LERCA (Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Térmico). Aos professores Bárbara Rangel, Humberto Varum e Ana Sofia, sou muito grato por toda a atenção, cuidado e contribuições científicas e experiências profissionais incríveis que vem somando conhecimento para o desenvolvimento da minha tese. Aos professores e amigos-irmãos Davi Teixeira e Jean Marcell, assim como aos meus queridos bolsistas por contribuírem diretamente nas discussões científicas, na coleta de dados e apoio logístico. Ao Instituto Federal do Ceará pela contribuição financeira e disponibilidade dos seus laboratórios, em nome dos professores Perboyre Alcântara, Marcos Porto e Tereza Raquel Lima Farias. Assim, como técnico de laboratório, o Engenheiro João Sabóia de Souza. A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que disponibilizou todos equipamentos e espaços físicos possíveis para a realização dos ensaios e estudos. Por fim, uma forte gratidão pelas trocas de conhecimentos profissionais e empíricos com os Mestres Márcio Holanda, bio-arquiteto, e o Mestre de Obras, José Augusto. A minha eterna gratidão a minha filha aos meus pais, meus amigos, uma família linda, que tem me apoiado emocionalmente nesse processo solitário de escrita.

RESUMO

Com a produção de componentes construtivos industrializados no início do século XX no Brasil, houve um abandono progressivo das tecnologias em terra crua. Em paralelo, houve produção de projetos e obras em terra como conjunto habitacional de Nova Gourná, no Egito e no Brasil o projeto do Conjunto Mondevale. A partir da década de 1970, na Europa e nos EUA acentuam-se as pesquisas sobre o comportamento térmico da construção em terra. No entanto, no Brasil, a construção em terra permanece apenas em vilarejos rurais como arquitetura vernácula, principalmente nos Estados do Ceará e Piauí. Desde a década de 1970, alguns arquitetos têm revistado a construção de casas particulares em terra no Ceará. Em ambos os casos são utilizadas técnicas vernáculas como o adobe, o pau a pique ou taipa de pilão com cobertura em telhado cerâmico ou a palha de palmeiras locais, nas habitações modernas também se utiliza o BTC e a terra ensacada.

Nos últimos anos, o Governo brasileiro tem produzido habitações econômicas através do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) com um projeto genérico para todo o país desadequadas das especificidades dos diversos climas do país e incompatível com as recomendações da NBR 15220. Com um custo maior de produção do que as construções vernáculas, o sistema construtivo é padronizado: alvenaria de tijolos cerâmicos revestido com argamassa cimentícia e cobertura em telhado cerâmico. Noutros países, há estudos que evidenciam que a construção em terra se apresenta como um bom moderador de temperatura em climas desérticos com noites frias, como Texas, nos EUA, ou temperados em Sardenha, Itália. Porém, em climas tropicais úmidos e semiáridos, como é o caso do Estado Ceará, não se tem estudos específicos para se averiguar seu comportamento.

A partir deste contexto, entende-se que o adobe, por ser uma técnica tradicional local, de baixo custo de produção com capacidade para atender às condições climáticas do estado do Ceará, pode ser uma solução para a habitação econômica no âmbito do PMCMV. Para auxiliar o desenvolvimento da proposta de arquitetura deste programa, propõe-se neste trabalho de investigação a sistematização de um conjunto de diretrizes bioclimáticas de apoio ao projeto, tendo como ponto de partida a arquitetura vernacular local em terra e a otimização do conforto térmico destas casas. De modo a atingir este objetivo, realiza-se um levantamento bibliográfico das tradições vernaculares da construção em terra no Brasil, assim como dos projetos de habitação com esta tecnologia. Em paralelo são organizadas as normas nacionais e recomendações na literatura especializada sobre os parâmetros arquitetônicos e construtivos para edificações em adobe no Ceará. Reunida esta informação, desenvolve-se um modelo térmico de uma habitação padrão PMCMV dentro da plataforma Energy Plus para avaliar o comportamento de soluções térmicas distintas para cada zona bioclimática do Ceará. Desta avaliação, são propostas algumas variáveis para otimizar o conforto térmico, nomeadamente as espessuras e cores das paredes e tipos de forro, isolamento e cores das coberturas. Terminada a validação destas variantes reúnem-se as recomendações para o desenvolvimento do projeto de arquitetura de habitações econômicas no âmbito do PMCMV em adobe, para o Estado do Ceará.

Palavras-chave: adobe, arquitetura bioclimática, arquitetura vernácula, e habitação econômica.

ABSTRACT

With the production of industrialized building components at the beginning of the 20th century in Brazil, there was a progressive abandonment of raw earth technologies. In parallel, there were production of projects and works on land such as a housing complex in Nova Gourná, in Egypt and in Brazil the Mondevalé project. From the 1970s onwards, in Europe and the USA, research on the thermal behavior of earthen construction increased. However, in Brazil, earth construction remains only in rural villages as vernacular architecture, mainly in the States of Ceará and Piauí. Since the 1970s, some architects have been reviewing the construction of private houses on land in Ceará. In both cases, vernacular techniques are used, such as adobe, wattle and daub or rammed earth with a ceramic roof covering or straw from local palm trees, in modern homes BTC and bagged earth are also used.

In recent years, the Brazilian Government has produced affordable housing through the Minha Casa Minha Vida Program (PMCMV) with a generic project for the entire country, inappropriate for the specificities of the different climates of the country and incompatible with the recommendations of NBR 15220. production than vernacular buildings, the construction system is standardized: masonry of ceramic bricks coated with cement mortar and covering in ceramic roof. In other countries, there are studies that show that earth construction is a good temperature moderator in desert climates with cold nights, such as Texas, in the USA, or temperate in Sardinia, Italy. However, in humid and semi-arid tropical climates, as is the case of Ceará State, there are no specific studies to investigate its behavior.

From this context, it is understood that adobe, as it is a traditional local technique, with a low production cost capable of meeting the climatic conditions of the state of Ceará, can be a solution for economic housing within the scope of the PMCMV. In order to help the development of the architectural proposal of this program, it is proposed in this research work the systematization of a set of bioclimatic guidelines to support the project, having as a starting point the local vernacular architecture on land and the optimization of the thermal comfort of these houses. . In order to achieve this objective, a bibliographic survey is carried out on the vernacular traditions of earth construction in Brazil, as well as on housing projects with this technology. In parallel, national standards and recommendations in the specialized literature on architectural and constructive parameters for adobe buildings in Ceará are organized. Having gathered this information, a thermal model of a standard PMCMV dwelling is developed within the Energy Plus platform to evaluate the behavior of different thermal solutions for each bioclimatic zone in Ceará. From this evaluation, some variables are proposed to optimize thermal comfort, namely the thickness and colors of the walls and types of lining, insulation and roof colors. After the validation of these variants, the recommendations for the development of the architecture project of affordable housing within the scope of the PMCMV in adobe, for the State of Ceará, are gathered.

KEYWORDS: adobe, bioclimatic architecture, vernacular architecture, and affordable housing.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	28
1.1 CONTEXUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	28
1.2 OBJETIVOS	34
1.2.1. OBJETIVO GERAL	34
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	34
1.3 METODOLOGIA	35
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	37
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	38

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE.....	39
1. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	39
2. ARQUITETURA DE TERRA NO BRASIL	42
2.1. ARQUITETURA PRÉ-COLONIAL EM TERRA	42
2.2. A ARQUITETURA EM TERRA DESDE O PERÍODO COLONIAL ATÉ HOJE	46
2.3. HABITAÇÃO ECONÓMICA RURAL COM TÉCNICAS VERNÁCULAS EM TERRA COMO LIÇÃO PARA A CASA RURAL ATUAL	53
2.3.1. SÍNTESE	68
3. PARAMETRIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM ADOBE	70
3.1. VOLUMETRIA	71
3.2. FORMALIZAÇÃO DO VÃO ESTRUTURAL	73
3.3. FUNDAÇÃO	74
3.4. CINTA	75
3.5. LINTÉIS	76
3.6. PAREDE	77
3.7. ARGAMASSA	77
3.8. ADOBE	78
3.9. SELEÇÃO DE SOLOS	80
3.10. GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO	80
3.11. LIMITES DE PLASTICIDADE DO SOLO	81
3.12. RETRAÇÃO DO SOLO	81
3.13. GRANULOMETRIA DO SOLO	81
3.14. TEOR DE SAIS DOS SOLOS	82

3.15.	CORREÇÃO DOS SOLOS	83
	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS	84
	IMPERMEABILIZAÇÃO DOS SOLOS	84
3.16.	PROCESSO DE PRODUÇÃO	85
3.17.	PROCESSO CONSTRUTIVO DO ADOBE	87
4.	DESEMPENHO CONSTRUTIVO DOS EDIFÍCIOS EM ADOBE	89
4.1.	DESEMPENHO ESTRUTURAL	89
4.2.	DURABILIDADE	92
4.2.1.	PROTEÇÃO CONTRA UMIDADE	93
4.2.2.	MANUTENÇÃO	95
4.3.	DESEMPENHO HIGROTÉRMICO	96
5.	ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PARA O BRASIL	113
5.1.	Classificações climáticas	114
5.2.	ESTRATÉGIAS DE APOIO AO PROJETO DE ARQUITETURA	122
5.2.1.	IMPLANTAÇÃO	122
5.2.2.	ABERTURAS E RENOVAÇÃO DE AR	124
5.2.3.	ENVOLTÓRIA	128
6.	SINTESE DO ESTADO DA ARTE	132
CAPÍTULO 3		
CASO DE ESTUDO		137
1.	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA DA HABITAÇÃO NO BRASIL	138
2.	PROGRAMA MINHA CASA E MINHA VIDA	140
3.	CONSTRUÇÕES DE ADOBE NO CEARÁ	142
4.	RECOMENDAÇÕES BIOCLIMÁTICAS PARA O CEARÁ	150
4.1.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	156
4.2.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	158
4.3.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	167
5.	CARACTERIZAÇÃO DO MODELO PMCMV RURAL	173
5.1.	PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS CASAS EM ADOBE E DO PMCMV	175
5.2.	MODELAGEM TÉRMICA	179
5.2.1.	CLIMA	179
5.2.2.	TIPOLOGIA ARQUITETÔNICA	182
5.2.3.	ORIENTAÇÃO	183
5.2.4.	PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS PAREDES, COBERTURA E PISO	184

5.2.5.	JANELAS E INFILTRAÇÃO DE AR	186
5.2.6.	ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E PESSOAS	187
5.2.7.	ESTRUTURA DO MODELO	189
6.	ANÁLISE TÉRMICA DO MODELO EM ALVENARIA CERÂMICA E ADOBE	190
6.1.	TIPOS DE PAREDES	195
6.1.1.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	195
6.1.2.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	197
6.1.3.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	200
6.1.4.	SÍNTESE	201
6.2.	ÁREA DOS CÔMODOS	202
6.3.	ORIENTAÇÃO	203
6.4.	SÍNTESE	203
7.	DESENVOLVIMENTO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS PARA ENVOLTÓRIA	206
7.1.	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DA ENVOLTÓRIA	206
7.2.	PAREDES	210
7.2.1.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	211
7.2.2.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	214
7.2.3.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	217
7.3.	COBERTURAS	219
7.3.1.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	220
7.3.2.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	223
7.3.3.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	226
7.4.	ISOLAMENTO TÉRMICO DAS COBERTURAS	228
7.4.1.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	229
7.4.2.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	231
7.4.3.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	233
8.	RECOMENDAÇÕES PARA ENVOLTÓRIA	235
9.	VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DOS MATERIAIS DA ENVOLTÓRIA	239
9.1.	VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DOS MATERIAIS DA ENVOLTÓRIA	240
9.1.1.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	241
9.1.2.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	246
9.1.3.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	250
9.1.4.	SÍNTESE	253
9.2.	VALIDAÇÃO GEOMÉTRICA DA ENVOLTÓRIA	259

9.2.1.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	263
9.2.2.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	265
9.2.3.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	266
9.2.4.	SINTESE	268
10.	RECOMENDAÇÕES BIOCLIMÁTICAS PARA O PROJETO DE ARQUITETURA DAS I HABITAÇÕES DO PMCMV NO CERÁ	270
10.1.	ESTUDO PRÉLIMINAR	272
10.1.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	272
10.1.2.	RESISTÊNCIA MECÂNICA DO ADOBE	275
10.2.	ANTE-PROJETO	276
10.2.1.	FORMALIZAÇÃO	277
10.2.2.	SISTEMA CONSTRUTIVO	278
10.2.3.	ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PARA OTIMIZAÇÃO DESEMPENHO TÉRMICO	279
a.	ZONA BIOCLIMÁTICA 5	281
b.	ZONA BIOCLIMÁTICA 7	283
c.	ZONA BIOCLIMÁTICA 8	284
10.3.	PROJETO EXECUTIVO	286
10.3.1.	FUNDAÇÃO	286
10.3.2.	PAREDE	287
10.3.3.	COBERTURA E PISO INTERMEDIÁRIO	289
11.	SÍNTESE DO CASO DE ESTUDO	290
CAPÍTULO 4		
CONCLUSÃO		292
1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	292
2.	DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS	294
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		296

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Beneficiários do Programa Minha Casa Minha Vida, faixa de renda I. Fonte: (RAMOS and NOIA 2016).....	29
Figura 2 - Déficit habitacional rural (2007 a 2012). Fonte (INO et al. 2019).	30
Figura 3 - Casa tipo Cajueiro Seco Acácio Gil Borsoi, 1963. Fonte: (BIERRENBACH 2008). 31	
Figura 4 – Construções de unidades habitacionais em adobe no assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).	31
Figura 5 - Gráfico de Graus-hora de resfriamento. Fonte: (LAMBERTS, 2016).	36
Figura 6 – Diagrama das etapas da metodologia.....	37
Figura 7 - Comportamento das publicações ao longo dos anos. Fonte: (L. PINHEIRO et al. 2016).	40
Figura 8 - Percentagem vs total de publicações em cada tema. Fonte: (L. PINHEIRO et al. 2016).	41
Figura 9 - Soluções de utilização dos “buracos de bugre” apresentadas por arqueólogos. Adaptado de (WEIMER 2014).	43
Figura 10 - Morada em toca, residência de Zabé da Loca, Monteiro, Paraíba, Brasil. Adaptado de (WEIMER 2005).	43
Figura 11 - Casa Aldeia com cúpula. Aldeia Uaurá, Alto Xingu. Fonte: (WEIMER 2014).....	44
Figura 12 – Corte construtivo da Casa Aldeia com cúpula. Aldeia Uaurá, Alto Xingu. Fonte: (adaptado de WEIMER 2014).	44
Figura 13 - Casa aldeia Tucano com telhado de 02 águas, Alto Rio Negro, Amazonas. Fonte: (WEIMER 2014).	45
Figura 14 - Cortes da Casa aldeia Tucano com telhado de 02 águas, Alto Rio Negro, Amazonas. Fonte: (WEIMER 2014).	45
Figura 15 - Casa aldeia Ianomâmi com pátio interno (WEIMER 2014).	46
Figura 16 - A casa de buriti das margens do rio São Francisco, em Barra, Bahia. Fonte: (WEIMER 2014).	47
Figura 17 – Esquema de montagem da taipa de mão. Fonte: Adaptado de (VEADO 2008).	47
Figura 18 – Preparação da massa do adobe com os pés. Fonte: Adaptado de (CARVALHO 2012)	48
Figura 19 – Desforma do adobe. Fonte: Adaptado de (CARVALHO 2012)	48
Figura 20 - Esquema taipa de pilão. Fonte: (COLIN 2010).	49
Figura 21 - Casa de fazenda em taipa de Pilão. Fonte: (KANAN, n.d.).	49
Figura 22 – Mapeamento de construção de terra no Brasil.	50
Figura 23 – Mapa da habitação econômica em técnicas vernáculas.	54
Figura 24 – Paineis de pau a pique pré-moldado, Cajueiro Seco, Acácio Gil Borsoi 1963. Fonte: (BIERRENBACH 2008).	55

Figura 25 - Casa tipo Cajueiro Seco Acácio Gil Borsoi, 1963. Fonte: (BIERRENBACH 2008).	55
Figura 26 - Planta projeto Cajueiro Seco, Acácio Gil Borsói, 1963. Fonte: (SOUZA and BEJA 2010)	55
Figura 27 - Detalhe da parede em taipa de mão. Fonte: (LOPES 1998).	56
Figura 28 - Trecho da cartilha “Transferência de tecnologia em habitação em saneamento”. ...	57
Figura 29 - Casa Carajás. Projeto: Fundação DAM. Carajás Pará, 1985. Fonte: (MELLO et al. 1985).	58
Figura 30 - Processo construtivo de Casa Carajás. Projeto: Fundação DAM. Carajás Pará, 1985. Fonte: (MELLO et al. 1985).	58
Figura 31 - Exemplos de painéis pré-fabricados em madeira para casas de pau a pique (MELLO et al. 1985).	58
Figura 32 - Casas da CEF. Projeto: José Guadêncio Torquato Márcio Machado. João Câmara - RN, 1987. Fonte: (W. LOPES and INO 2000).	59
Figura 33 - Casa do vigilante, 1993. Fonte: (LOPES 1998).	59
Figura 34 - Unidade habitacional do Parque Wall Ferraz, 1996. Fonte: (LOPES 1998).	60
Figura 35 - Parque Wall Ferraz, 1996. Fonte: (LOPES 1998).	60
Figura 36 - Vila Mão Santa, 1994. Fonte: (LOPES 1998).	60
Figura 37 – Protótipo Casa Castelinho, Fortaleza, Ceará. 1993. Fonte: (LOPES 1998).	61
Figura 38 – Protótipo Casa do Nilo, São Gonçalo, Rio de Janeiro. 1991. Fonte: (LOPES 1998).	61
Figura 39 – Residência Serra Azul (LOPES 1998).	61
Figura 40 – Residência Serra Azul, vista interna (LOPES 1998).	61
Figura 41 - Construção em Bayeux, PB, no ponto de receber o entramado. Fonte: (LOPES 1998).	62
Figura 42 - Detalhe de colocação dos paus a pique. Fonte: (LOPES 1998).	62
Figura 43 - Protótipos 1 e 2 e atual sede do grupo HABIS, São Carlos, São Paulo, 1997 e 1999. Fonte: (LOPES 1998).	63
Figura 44 – Capacitação da comunidade na produção de adobes no assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).	64
Figura 45 – Unidade habitacional 3(BQf) do assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).	64
Figura 46 – Planta Baixa da unidade habitacional (3QBd) do assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).	64
Figura 47 – Planta Baixa da unidade habitacional (3QBf) do assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).	64
Figura 48: Planta Assentamento rural Sepé Tiaraju. casa 2QC. Fonte: (SILVA et al. 2006)	65

Figura 49: Planta Assentamento rural Sepé Tiaraju. casa 3QC. Fonte: (SILVA et al. 2006)	65
Figura 50:Planta Assentamento rural Sepé Tiaraju casa 2QA. Fonte: (SILVA et al. 2006).	65
Figura 51: Assentamento rural Sepé Tiaraju, Casa de adobe antes e depois do colapso. Fonte: MAIA 2011).	66
Figura 52: Casa Família Weiss, Paial/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010).	67
Figura 53: Planta da casa Família Weiss, Paial/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010).	67
Figura 54: Casa Família Bueno, Pinhalzinho/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010).	67
Figura 55: Planta da casa Família Bueno, Pinhalzinho/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010)	67
Figura 56 - Planta Baixa. Fonte: (PROMPT 2008).	68
Figura 57 - Construção do telhado. Fonte: (PROMPT 2008).	68
Figura 58 - Muro com contrafortes. Fonte: (VARUM et al. 2005).	71
Figura 59 - Adobe em paredes de poços de água. Fonte: (VARUM et al. 2005).	71
Figura 60 – Espessuras de paredes e números de pavimentos.	72
Figura 61 - Edificação em adobe com 02 pavimentos - Casa de campo, Brasil, 2016 (CAVALCANTE 2016).	72
Figura 61 - Construções em adobe na cidade de Shibam, Iémen. Fonte: (GOMES 2012).	73
Figura 63 – Limites dos vãos para uma edificação em adobe.	73
Figura 64 – Planta projeto da Creche, 1938 (RUANO et al. 2010).	74
Figura 65 – Recomendações para fundações em adobe segundo a ABNT (2020).	74
Figura 66 –Detalhes construtivos de fundações em adobe tradicionais em Portugal.	75
Figura 67 – cinta de amarração sobre a alvenaria de adobe. Fonte: (M. HOLANDA & RODRIGUEZ, 2013)	76
Figura 68 – Coxim sobre a alvenaria de adobe. Fonte: (ABNT, 2020).	76
Figura 69 - Uso de arcos em adobe para vencer os vão das aberturas. Fonte: (VARUM et al., 2005).	77
Figura 70 - Uso de barrotes de madeira para vencer os vão das aberturas. Fonte (VARUM et al., 2005).	77
Figura 70 – Assentamento de adobes vazados. Fonte: (ABNT, 2020).	78
Figura 71 - Parâmetros para dimensionamento do adobe. Fonte: (ABNT, 2020).	79
Figura 73 – adobes com formatos especiais. Fonte: (MINKE, 2005)	80
Figura 74 - Tijolos que fissuram durante a execução devido à presença de chuva. Fonte: (MINKE, 2005).	85
Figura 75 - Adobe em paredes de poços de água. Fonte (VARUM et al., 2005).	85
Figura 76 – Etapas do processo de produção dos adobes.	86

Figura 77- adoberia – produção de adobes. Fonte: (HOLANDA, 2016).	87
Figura 78- adoberia – transporte de adobes. Fonte: (HOLANDA, 2016).	87
Figura 79 – Escavação das valas da fundação.	87
Figura 80 – Assentamento da primeira fiada de adobes.	88
Figura 81– Execução do reboco da alvenaria de adobe.	89
Figura 82 – Proteção para base das paredes. Fonte: (HOLANDA, 2016).	94
Figura 83 – Proteção para base das paredes. Fonte: (HOLANDA, 2016).	94
Figura 84 – Desvão de ventilação.	95
Figura 85 - Variação da condutibilidade térmica em função da densidade.	99
Figura 86 - Planta da unidade habitacional assentamento rural Sepé Tiaraju, Serra Azul, Brasil. Fonte: (FRANCISCO, 2011).	105
Figura 87 - Nomograma de temperatura efetiva para pessoas normalmente vestidas em trabalho leve, resultados casos 01 e 02. Fonte: (FRANCISCO, 2011)	107
Figura 88 - Percentagem de redução da temperatura do ar interior da temperatura do ar exterior quente ao meio-dia para ensaios com e sem paredes exteriores. Fonte: (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006).	110
Figura 89 - Diminuição percentual da temperatura exterior máxima com diferentes tamanhos de janela. Fonte: (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006).	110
Figura 90 – Esquema de melhorias de cabanas feitas em tabique. Fonte: adaptada de (BRUNO and FARIA, 2010).	111
Figura 91 – Muxarabi. Fonte: (SOUZA, 2016).	112
Figura 92 – Pátio Interno. Fonte: (SOUZA, 2016).	112
Figura 93 - Estratégias de aquecimento e resfriamento. Fonte: (LAMBERTS and DUTRA, 2014).	114
Figura 94 - Classificação climática Koppen. Fonte: (SAMPAIO et al. 2011)	116
Figura 95 - Classificação climática de Thornthwaite para o Brasil. Fonte (SAMPAIO et al., 2011).	118
Figura 96 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: (ABNT, 2005)	120
Figura 97 -Carta bioclimática, adaptada de Givoni. Fonte: (ABNT, 2005)	122
Figura 98 - Planta de situação. Fonte: (PROJETEEE, 2020)	123
Figura 99 – Orientação dos cômodos. Fonte: (LAMBERTS, 2016).	123
Figura 100 - Espaçamento entre as construções. Fonte: (LENGEN, 1996).	124
Figura 101 - tipos de aberturas para cômodos aberturas controláveis e fixas (PROJETEEE 2020).	125
Figura 102 - Sistemas de proteção à radiação. Fonte: (LAMBERTS, DUTRA, and PEREIRA 2014)	126

Figura 103 - Sistemas captadores de energia direta. Fonte: (PROJETEEE, 2020).....	131
Figura 104 - Sistemas de inércia. Fonte: (PROJETEEE, 2020).....	132
Figura 105 - O déficit habitacional rural apresenta como maior problemática as habitações precárias. Fonte: (FJP 2018).....	139
Figura 106 - Tipologia 1 - 02 cômodos.....	141
Figura 107 - Tipologia 2 - 03 cômodos.....	141
Figura 108 - Planta tipologia 1 – Programa Minha Casa e Minha Vida Rural Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).	141
Figura 109 - Planta tipologia 2 – Programa Minha Casa e Minha Vida Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).	141
Figura 109 – Tipologias de paredes de pau a pique, madeira e palha para habitações no Ceará.	142
Figura 111 – habitação precária no município de Barro, tipo casa de pau a pique sem reboco.	143
Figura 112 – habitação precária no município de Ubajara, tipo casa com banheiro improvisado com parede de palha.	143
Figura 113 – Mapa de adobe no Ceará. FONTE: CARVALHO (201).	144
Figura 114 - Fundação Baldrame em pedra com argamassa cimentícia. Fonte: (CARVALHO, 2012)	144
Figura 115 - Fundação Baldrame em tijolo cerâmico vazado com argamassa de terra. Fonte: (CARVALHO, 2012).....	144
Figura 116 - Cobertura com telhado cerâmico e madeira de desgalhe, habitação tradicional em Viçosa do Ceará. Fonte: (CARVALHO, 2012).	145
Figura 117 - Cobertura com telhado cerâmico e madeira de serrada, habitação tradicional em Ibiapina. Fonte: (ALCÂNTARA et al., 2018).....	145
Figura 118 - Verga em madeira de uma habitação de adobe tradicional. Fonte: (CARVALHO, 2012).	145
Figura 119 - Verga em concreto armado de uma habitação de adobe tradicional. Fonte: (CARVALHO, 2012).	145
Figura 120- Adobes sem aditivos em Ibiapina. Fonte: (ALCÂNTARA et al., 2018).....	146
Figura 121- Adobes sem aditivos em Viçosa do Ceará. Fonte: (CARVALHO, 2012).....	146
Figura 122- Argamassa de solo cimento, casa tradicional em Ibiapina. Fonte: (ALCÂNTARA et al, 2018).....	149
Figura 123- Argamassa de cal, casa tradicional em adobe. Fonte: (CARVALHO, 2012).....	149
Figura 124- Soluções construtivas tradicionais em adobe no Ceará.	149
Figura 125 – Mapa de localização do Estado do Ceará, Brasil.	150
Figura 126 - Classificação bioclimática. Fonte: adaptado de (ABNT, 2013).	152

Figura 127 - Mapas de classificação climática de Thornthwaite e Köppen e Zoneamento Bioclimático para o estado do Ceará (MUNIZ et al, 2017).	154
Figura 127– Sistema de ventilação cruzada com venezianas.....	157
Figura 128 - Estratégias bioclimáticas para zona 5.....	158
Figura 129 — Estratégias bioclimáticas da zona bioclimática 7 e classificação climática de Köppen e Thornthwaite (MUNIZ et al, 2017).	160
Figura 130 – Implantação plantas e espaçamento compacto entre elas.	161
Figura 131 – Ventilação cruzada por efeito chaminé.....	162
Figura 132- Estratégias bioclimáticas para zona 7.....	167
Figura 133 – Estratégias bioclimáticas para zona 8.	168
Figura 134 – Detalhe de janelas com o controle de ventilação e iluminação.....	169
Figura 135- Desempenho da variação da transmitância e absorvências de coberturas na cidade de Manaus, zona bioclimática 8. Fonte: (CHVATAL, 2014).	170
Figura 136– Desempenho da variação da transmitância e absorvências de paredes na cidade de Manaus, zona bioclimática 8. Fonte: (CHVATAL, 2014).	171
Figura 137 - Estratégias bioclimáticas para zona 8.....	173
Figura 138 - Perspectiva tipologia 1 – PMCMV Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).	174
Figura 139 - Planta tipologia 1 – PMCMV Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).	174
Figura 140 - Perspectiva tipologia 2 – PMCMV Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).	174
Figura 141 - Planta tipologia 2 – PMCMV Rural Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).	174
Figura 142 – média mensal de umidade das cidades de Guaramiranga, Crateús e Fortaleza.	180
Figura 144 – Planta Baixa da tipologia 2 MCVM do estado do Ceará	183
Figura 145 – Corte transversal da tipologia 2 MCVM do estado do Ceará	183
Figura 146 – Variáveis orientações.....	184
Figura 147 – Detalhe construtivo parede tipo A.	185
Figura 148 – Detalhe construtivo parede tipo B.....	185
Figura 149 – Padrão de ocupação.	188
Figura 150 – Padrão de uso da iluminação.	189
Figura 151 – Planta baixa modelo PMCMV.....	192
Figura 152 – Temperatura limite e zona de conforto e desconforto para as ZBs 5, 7 e 8.....	194
Figura 153 - Conforto e desconforto para frio ou calor para as zonas bioclimática 5, 7 e 8.....	194
Figura 154 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico.	195

Figura 155 – Temperatura horária do dia 15 de agosto, dia típico de inverno.....	196
Figura 156 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 7.....	198
Figura 157 – Temperatura horária do dia 2 de novembro, dia típico de primavera.....	199
Figura 158 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 7.....	200
Figura 159 – Temperatura horária do dia 2 de novembro, dia típico de primavera.....	201
Figura 160 – paredes para habitações em adobe.....	209
Figura 161 – Coberturas sem forro para habitações em adobe.....	210
Figura 162 – Coberturas com forro para habitações em adobe.....	210
Figura 163 – Percentual de conforto e desconforto anual vs absorvância para zona bioclimática 5.....	212
Figura 164 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvância zona bioclimática 5.....	213
Figura 165 – Percentual de conforto e desconforto anual vs absorvância para modelo parede $e=32\text{cm}$, $\alpha=0,75$ zona bioclimática.....	213
Figura 166 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvância.....	214
Figura 167 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvância, zona bioclimática 05.....	215
Figura 168 – Temperatura horário de um dia típico de inverno.....	216
Figura 169 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvância 0,2 com $e=0,48\text{cm}$	217
Figura 170 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvância para paredes - zona 8.....	218
Figura 171 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvância para zona bioclimática 08.....	218
Figura 172 - Percentual de conforto e desconforto vs absorvância 0,4 com $e=0,48\text{cm}$	219
Figura 173 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvância para coberturas zona 5.....	221
Figura 174 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvância para as coberturas na zona bioclimática 5.....	222
Figura 175 – comportamento anual do conforto e desconforto para o modelo de cobertura com $\alpha=0,75$ e laje na zona bioclimática 5.....	222
Figura 176 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvância para as coberturas na zona 7.....	224
Figura 177 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvância para zona bioclimática 7.....	225
Figura 178 – comportamento anual do conforto e desconforto para o modelo de cobertura com $\alpha=0,4$ e forro PVC na zona bioclimática 7.....	225

Figura 179 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvência das coberturas na zona bioclimática 8.....	226
Figura 180 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvência para zona bioclimática 8.....	227
Figura 181 – comportamento anual do conforto e desconforto para o modelo de cobertura com $\alpha = 0,2$ e forro com laje volterrana na zona bioclimática 8.....	228
Figura 182 – Detalhe de cobertura de forro com isolamento.....	229
Figura 183 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvência para cobertura isoladas na zona 5.....	229
Figura 184 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvência para zona bioclimática 5.....	230
Figura 185 –Cobertura com $\alpha = 20\%$ e laje de forro isolado.....	230
Figura 186 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvência para cobertura isoladas na zona 7.....	231
Figura 187 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvência para zona bioclimática 7.....	232
Figura 188 – Forro PVC a 20%.....	232
Figura 188 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvência para coberturas isoladas na zona 8.....	233
Figura 190 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvência zona bioclimática 8.....	234
Figura 191 – Forro de gesso PVC com isolamento e $\alpha = 0,75$	234
Figura 192 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 5	236
Figura 193 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 7.....	237
Figura 194 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 8	238
Figura 195 – perspectiva modelo 1	239
Figura 196 – planta baixa modelo 1	239
Figura 197 – perspectiva modelo 2	240
Figura 198 – planta baixa modelo 2.....	240
Figura 198 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 5.1	243
Figura – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 5.2.....	243
Figura – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 5.2.1.....	245
Figura – Recomendações térmicas para construções em adobe para a zona bioclimática 5....	246
Figura – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 7.1.1.....	248
Figura – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 7.2.1.....	249
Figura – Recomendações térmicas para construções em adobe para a zona bioclimática 5.....	249

Figura – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 8.1	252
Figura – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 8.2.....	252
Figura – Recomendações térmicas para construções em adobe para a zona bioclimática 8. ...	253
Figura 208 – Propriedades térmicas do modelo padrão PMCMV	254
Figura – Propriedades térmicas do modelo PMCMV adaptado a zona bioclimática 5.	255
Figura – Propriedades térmicas do modelo padrão PMCMV adaptado a ZB 7.	256
Figura – Propriedades térmicas do modelo padrão PMCMV adaptado a ZB 8.	257
Figura – Média anual de conforto e desconforto térmico do modelo padrão e modelo adaptado.	258
Figura 214 – Perspectiva modelo 2.	261
Figura 215 – Planta baixa modelo 2.	261
Figura 216 – Corte transversal modelo 2.	262
Figura 217 – Corte construtivo modelo 2.	262
Figura 218 – Detalhe construtivo esquadrias.	262
Figura 219 – variáveis orientações.....	263
Figura 220 – Análise comparativa modelo 5.1. e 5.2.....	264
Figura 221 – Análise comparativa modelo 7.1. e 7.2.....	266
Figura 222 – Análise comparativa modelo 8.1. e 8.2.....	268
Figura 223 - Diagrama das etapas de projeto.	271
Figura 224 – Recomendações dimensionais do adobe.....	273
Figura 225 – Obras tradicionais e contemporâneas em adobe no Ceará.....	274
Figura 226 - parede simples paredes dobradas em adobe.	277
Figura 227 - Parâmetros estruturais para os vãos.....	278
Figura 228 – Recomendações de proteção contra a umidade para as construções em adobe. ..	279
Figura 229– Comportamento térmico das construções em adobe.....	281
Figura 230 – Zoneamento bioclimática Ceará com destaque para cidades da zona bioclimática 5. Fonte: adaptado de (ABNT 2020).	281
Figura 231 – Zoneamento bioclimática Ceará com destaque para cidades da zona 7. Fonte: adaptado de (ABNT, 2020).	283
Figura 232 – Zoneamento bioclimática Ceará com destaque para cidades da zona 8. Fonte: adaptado de (ABNT, 2020).	285
Figura 233 – corte construtivo da fundação de paredes de adobe.....	287
Figura 234 – amarração de meio bloco para paredes de adobe.....	288
Figura 235 – Assentamento de adobes vazados (ABNT, 2020).....	288

Figura 236 – Parâmetro de verga sobre o vão.	289
Figura 237 –Parâmetro de arcos sobre os vãos.	289
Figura 238 – Cinta de amarração.	289
Figura 239 – Coxim sobre a alvenaria de adobe.	290

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Técnicas construtivas brasileiras tradicionais na atualidade	52
Tabela 2 – linha do tempo das construções em terra com design contemporâneo no Brasil	69
Tabela 3– resumo das propriedades do adobe.....	83
Tabela 4– Resistência mecânica dos blocos de adobe	90
Tabela 5 – Quadro-resumo de regulamentação e normalização da construção com terra.....	91
Tabela 6 – Variação dos valores das propriedades gerais	97
Tabela 7 - Variação dos valores das propriedades térmicas.....	98
Tabela 8 - Variação dos valores das propriedades hídricas.....	101
Tabela 9 – Resumo dos trabalhos científicos sobre comportamento higrotérmico do adobe ...	103
Tabela 10 – Estudos de camadas de isolamento para paredes.....	104
Tabela 11 - Resumo dos comportamentos das casas de adobe e tijolo cerâmico.....	106
Tabela 12 - Condutividade térmica das camadas da parede para diferentes tipos de paredes modeladas.....	108
Tabela 13 - Variações nos parâmetros usados para cada simulação	108
Tabela 14 – Recomendações para habitações em adobe em climas.....	113
Tabela 15 - Tipos climáticos de Koppen-Geiger para o Brasil.	116
Tabela 16 –Tipos climáticos segundo Thornthwaite –1948, baseados no índice de umidade. .	117
Tabela 17 – Matriz de comparação entre as classes climáticas de Koppen-Geiger e Thornthwaite	119
Tabela 18 – Aberturas para ventilação.	124
Tabela 19 – Aberturas para ventilação.....	127
Tabela 20 – Parâmetros paredes e coberturas leves	129
Tabela 21– Materiais isolantes para edifícios.	130
Tabela 22 – Parâmetros das paredes pesadas	130
Tabela 23 - Variação dimensional dos blocos de adobe	146
Tabela 24 – resistência mecânica adobe no Ceará	148
Tabela 25 – Classificação climática e zona bioclimática no Ceará.....	153
Tabela 26 – Parâmetros térmicos para cobertura	155
Tabela 27– Parâmetros térmicos para as paredes.....	155
Tabela 28– Critérios de avaliação de desempenho térmico para o verão.....	156
Tabela 29 - Critérios de avaliação de desempenho térmico para o verão	158
Tabela 30 – Estratégias bioclimáticas cidades do Ceará pertencentes a zona 7.....	159

Tabela 31 – Desempenho dos graus horas dos sistemas de sombreamento, comparados ao sistema sem sombreamento.....	163
Tabela 32 – Recomendações para envoltória Zona bioclimática 7.....	164
Tabela 33– Síntese das recomendações térmicas para habitação econômica na ZB 7.....	166
Tabela 34 – Critérios de avaliação de desempenho térmico para o verão.....	167
Tabela 35 – Recomendações para envoltória Zona bioclimática 8.....	170
Tabela 36 – Síntese das recomendações térmicas para habitação econômica na Zona bioclimática 8.....	172
Tabela 37 – Parâmetros para os tipos de paredes e coberturas para habitações em adobe	176
Tabela 38 – Propriedades térmicas e custos dos tipos de coberturas	176
Tabela 39 - Parâmetros para habitações em PMCMV e adobe.....	178
Tabela 40 – Caracterização climática das zonas 05, 07 e 08.....	180
Tabela 41 – Temperaturas médias, mínimas e máximas das zonas 05, 07 e 08.....	181
Tabela 42– Temperatura dos solos.....	182
Tabela 43 – Propriedades térmicas do piso.....	184
Tabela 44 – Propriedades térmicas das paredes.....	185
Tabela 45 – Parâmetros NBR 15575.....	186
Tabela 46 – Propriedades térmicas da cobertura.....	186
Tabela 47 – Parâmetros térmicos para as janelas e infiltração de ar.....	187
Tabela 48– Taxas metabólicas para cada atividade.....	188
Tabela 49–Densidade de potência instalada de iluminação.....	189
Tabela 50 – Cargas internas de equipamentos.....	189
Tabela 51– Estrutura do modelo térmico	190
Tabela 52 – Área dos componentes da envoltória e paredes internas.....	191
Tabela 53 – Temperatura limite superior e inferior.....	193
Tabela 54 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico.....	196
Tabela 55 - Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 7.....	198
Tabela 56 - Conforto e desconforto por frio e calor dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 5, 7 e 8.....	202
Tabela 57 - Diferença entre o percentual de conforto máximo e mínimo quando se variam os cômodos.....	203
Tabela 58 - Conforto, desconforto por frio e calor dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para as Zonas 5, 7 e 8.....	204

Tabela 59 – Estratégias e recomendações para envoltória para as zonas 5, 7 e 8.	205
Tabela 60 - Conforto, desconforto por frio e calor dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para as Zonas.....	206
Tabela 61 – Variáveis dependentes e independentes para os modelos térmicos.....	208
Tabela 62 – paredes para habitações em adobe.....	208
Tabela 64 – Coberturas para habitações em adobe	210
Tabela 65 - Propriedades térmicas das paredes de adobe.	211
Tabela 65 - Propriedades térmicas das coberturas para edificações em adobe.	220
Tabela 66 - Propriedades térmicas das coberturas isoladas.....	228
Tabela 67 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 5.....	235
Tabela 68– Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 7.....	236
Tabela 69 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 8.....	237
Tabela 70 – Modelos térmicos PMCMV em adobe	240
Tabela 71 – Propriedades térmicas do modelo 5.1.1.....	241
Tabela 73 – Propriedades térmicas do modelo 5.1.2.....	242
Tabela – Propriedades térmicas do modelo 5.1.2.....	244
Tabela – Propriedades térmicas do modelo 7.1.1.....	246
Tabela – Propriedades térmicas do modelo 7.1.2.....	247
Tabela – Propriedades térmicas do modelo 8.1.2.....	251
Tabela – Recomendações térmicas para paredes de adobe em habitação social.....	259
Tabela 78 – Propriedades térmicas do modelo 5.2.....	263
Tabela 79 – Propriedades térmicas do modelo 7.1.....	265
Tabela 80 – Propriedades térmicas do modelo 8.2.....	267
Tabela 81 – check list para desenvolvimento de um projeto arquitetônico em adobe.	271
Tabela 82 – Parâmetros de composição granulométrica do solo para adobe.	272
Tabela 83 – Limites de Attemberg para o adobe.....	273
Tabela 84 - tipos de solos para adobe no Ceará.	274
Tabela 85 – síntese do desempenho mecânico de adobes nos municípios do Ceará.....	275
Tabela 86 – Estratégias bioclimáticas para habitações em adobe para zona bioclimática 5.	282
Tabela 87 – Estratégias bioclimáticas para habitações em adobe para zona bioclimática 7.	284
Tabela 88 – Estratégias bioclimáticas para habitações em adobe para zona bioclimática 8.	285

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α - Absortância

ρ – Densidade

λ – condutibilidade térmica

c – calor específico

W_{cap} - umidade de saturação capilar

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BTC – Bloco de Terra Comprimida

CRESOL - Cooperativa de Crédito Rural com Interação Solidária Central

CT – Capacidade Térmica

CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico

CEARAH Periferia - Centro de Estudos, Articulação e Referência sobre Assentamentos Humanos

COHAB-CE - Companhia de Habitação do Estado do Ceará

CYTED - Programa Ibero-Americano de Ciência y Tecnología para el Desarrollo

CEF – Caixa Econômica Federal

DAM - Centro de Desenvolvimento das Aplicações da Madeira

PROJETEEE – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes

IPEP - Instituto de Permacultura e Ecovilas da Pampa

IBAM - O Instituto Brasileiro de Administração Municipal

INCRA – Instituto de Colonização e Reforma Agrária

IPEP - Instituto de Permacultura e Ecovilas da Pampa

FS_o - Fator solar

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

FV – Fator de ventilação

GHR – Graus horas resfriamento

EUA – Estados Unidos da América

HABIS - Grupo de Pesquisa em Habitação e Sustentabilidade

K - coeficiente de transmissão térmica $[W/m^2K]$

LR - limite de retração

LL - limite de liquidez

PL - limite de plasticidade

IP o índice de plasticidade

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NEPHU (Núcleo de Estudos e Projetos Habitacionais e Urbanos)

NBR – Norma Brasileira

NMAC - New Mexico Administrative Code

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética da Edificações Residenciais

RH - Umidade

PROAFA - Programa de Assistência às Favelas da Região Metropolitana de Fortaleza

PROECOTUR - Programa de Apoio ao Ecoturismo e à Sustentabilidade Ambiental do Turismo

PNRA: Plano Nacional de Reforma Agrária

PMCMV – Programa Minha Casa Minha Vida

PNHR – Plano Nacional de Habitação Rural

PROTERRA - Rede Ibero-Americana de Arquitetura e Construção com Terra

RIBA - Royal Institute of British Architects

U – transmitância térmica

ONGs – Organização Não Governamental

Sintraf - Sindicato dos Trabalhadores na Agricultura Familiar
SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Ti - temperaturas internas

Te - externas máximas

USINA- Centro de Trabalhos para o Ambiente Habitado

VLP - viga laminada pregada

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção em terra reúne um conjunto de técnicas construtivas tradicionais que ainda são utilizadas no Brasil, como adobe e pau-a-pique, principalmente nas zonas rurais dos estados do Nordeste brasileiro no Piauí e Ceará. A construção em adobe, segundo Carvalho (2012), tende a ser mais econômica que a construção corrente em tijolo cerâmico quando aplicada em habitações econômicas. Do mesmo modo, Heathcote (2010), afirma que a construção em adobe é um moderador de temperatura. Assim, como o adobe é a única técnica tradicional normatizada no Brasil, é viável o seu uso em programas habitacionais do governo. No entanto, para se poder implementar a sua aplicação torna-se necessário o estudo sobre alvenaria de adobe em climas tropicais quentes, como é o caso do Ceará, para apoiar a decisão dos arquitetos.

Em contraponto, os conjuntos habitacionais produzidos pelo governo brasileiro são todos todas padronizadas, produzidas com materiais industriais, que por vezes não atendem a cultura construtiva necessidades climáticas locais. As coberturas são revestidas a telha cerâmica sobre uma estrutura de madeira ou metálica e forro de PVC e laje volterrana com EPS. Quanto à parede, utilizam-se blocos de cerâmico vazados, rebocados com argamassa cimentícia, soluções construtivas que não atendem aos parâmetros térmicos NBR 15220 (RODRIGUEZ and INO 2016).

Foi deste ponto de partida que foi desenvolvida esta pesquisa, que busca desenvolver diretrizes arquitetônicas para a construção em adobe no Ceará, visando o conforto térmico. A seguir serão detalhados alguns pontos da pesquisa como contextualização, problema de pesquisa, contribuições, objetivos, metodologia, delimitação e estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Rodriguez and Ino (2019), nas últimas décadas, o governo brasileiro tem investido pouco na produção da habitação rural se comparada à habitação urbana. Os primeiros programas habitacionais surgiram nas cidades na década de 1930 promovidas pela Fundação da Casa Popular. Somente na década de 1940 se inicia uma tímida produção de habitações rurais (RODRIGUEZ and Ino 2019).

Foi apenas na década de 1970 que as políticas habitacionais rurais se consolidaram com a criação do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). No final dos anos 2000, pelo Plano Nacional de Habitação Rural (PNHR), criou-se o programa Minha Casa e Minha Vida (MCMV), que se propôs a reduzir o déficit habitacional brasileiro através do financiamento de habitações urbanas e rurais. O PNHR tem se mostrado mais eficaz que os programas anteriores no quesito quantidade de habitações produzidas, pois o governo no

período facilitou o acesso a crédito aos beneficiários e construtoras. Porém, têm-se produzido habitações a partir de tipologias urbanas, não adequadas às necessidades rurais: não são utilizadas técnicas construtivas tradicionais: não há preocupação com as variações climáticas de cada região brasileira e os espaços são dimensionados a partir de uma realidade urbana (INO et al. 2019).

O número de habitações rurais produzidas pelo INCRA de 1972 a 2009 foi de 63.480 unidades, representando uma produção de 1.715 unidades por ano. Com a implantação do programa MCMV esse índice aumentou para 73.377 unidades rurais no ano de 2014, o que representa a produção média de 1.979 unidades por ano. A região Nordeste, uma das que apresenta um dos maiores déficits habitacionais no Brasil considerando o número de beneficiários por região (INO et al. 2019), foi aquela que contemplou o maior número de beneficiários na primeira fase do programa, com 91.728 pessoas. Já na região Norte, aquela que apresenta o menor déficit habitacional, foram contemplados 21.052 beneficiários (RAMOS and NOIA 2016) (ver Figura 1).

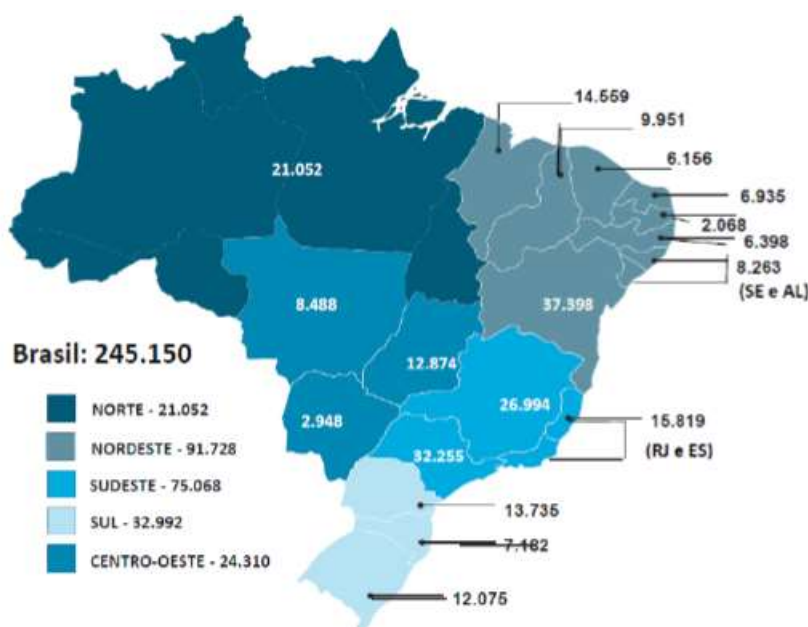


Figura 1 - Beneficiários do Programa Minha Casa Minha Vida, faixa de renda I. Fonte: (RAMOS and NOIA 2016).

O aumento da produção habitacional tem provocado a redução do déficit habitacional rural entre os anos de 2007 e 2012, em particular com implantação do programa MCMV em 2009. O déficit habitacional brasileiro é dividido, segundo a Fundação João Pinheiro, em 6 categorias: domicílios rústicos, improvisados, cômodos, conviventes com intenção de mudar, excedente de aluguel e adensamento. O déficit habitacional rural entre os anos de 2007 e 2012 apresenta maior índice na tipologia domicílios rústicos, isto é, habitações feitas com materiais locais de forma precária, ao longo de todo período. Isso pode ser explicado pela grande quantidade de casas de pau a pique construídas de forma precária na zona rural brasileira, seguida da tipologia conviventes com intenção de mudar, que está associada ao crescimento das famílias e à necessidade de novas moradias. Esse fenômeno ocorre pelo fato de a reforma agrária no Brasil não ter sido efetivada, assim, ainda existem muito trabalhadores rurais morando em imóveis

cedidos pelos padrões. As outras tipologias, como domicílios improvisados, cômodos e excedente de aluguel não têm muito relevância, pelo fato de que são categorias ligadas a problemáticas urbanas (ver Figura 2) (INO et al. 2019).

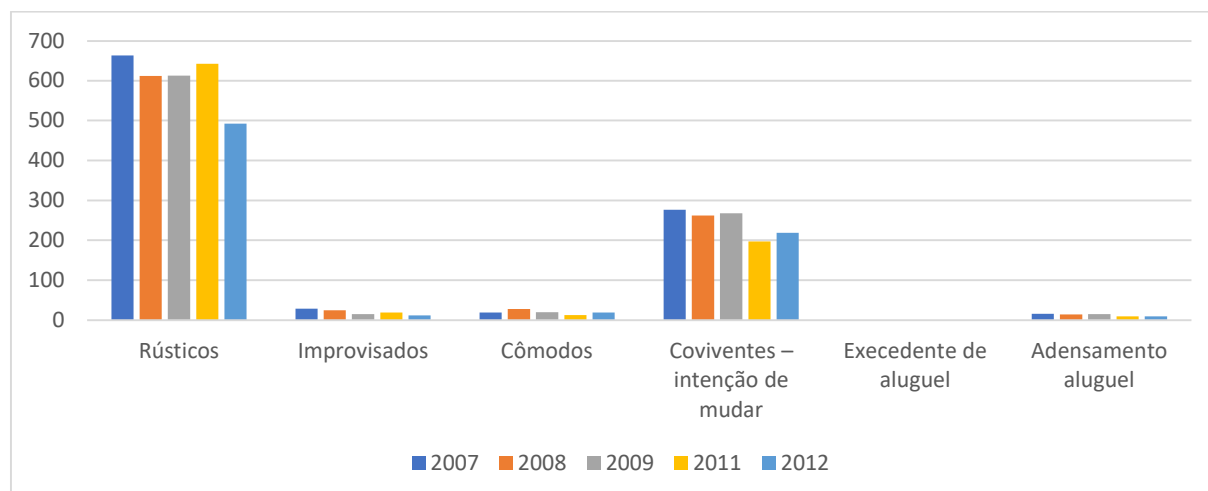


Figura 2 - Déficit habitacional rural (2007 a 2012). Fonte (INO et al. 2019).

Mesmo com o mérito de uma maior produção de unidades habitacionais do que os programas anteriores, ainda há muitas lacunas a serem resolvidas no MCMV, como a adequação térmica ao clima de cada região e à cultura de cada população. O PNHR generaliza o uso de materiais industriais normatizados como telhas cerâmicas, telhas de fibrocimento, blocos de concreto e blocos cerâmicos para todo o país, não abrindo possibilidade para uso de técnicas e materiais vernáculos, pois não são normatizados (com exceção da alvenaria de adobe, que foi recentemente normatizada no ano de 2019). Os projetos de arquitetura são generalizados sem variação tipológica e morfológica, não havendo recomendações específicas para cada região brasileira e respetiva variação cultural. Não são feitas recomendações de otimização do desempenho passivo como o uso de sistemas de ventilação cruzada, forro ventilado ou sombreamento das aberturas, como por exemplo uso de varandas ou brises. Quanto à envoltória, permite-se qualquer elemento de vedação vertical, desde que seja um sistema construtivo normatizado, não havendo preocupações em atender aos requisitos das normas NBR 15220 e NBR 15575, quanto a transmitância, capacidade térmica e absorvância. No caso das coberturas, recomenda-se o uso de telhas cerâmicas sem forro para as regiões Norte, Nordeste e Centro Oeste; e para o Sul e Sudeste, o uso de telhas de fibrocimento com forro PVC (A. W. B. de C. CARVALHO, PAULA, and PEREIRA 2017). As soluções apontadas para cobertura para o Norte, Nordeste e Centro Oeste não atendem aos requisitos mínimos de transmitância e capacidade térmica das NBR 15220 e NBR 15575 (ABNT 2005) e (ABNT 2013).

Na sua pesquisa Rodriguez (2016) verificou que nos assentamentos rurais produzidos pelo PMCMV Rural no Estado de São Paulo, existe uma série de incompatibilidades com a realidade local, seja do ponto de vista climático e cultural. As unidades habitacionais analisadas (localizadas no assentamento Florestan Fernandes, situado no município de Mirandópolis) são todas padronizadas, sendo uma única tipologia arquitetônica por assentamento. Assemelham com a habitação urbana não considerando os hábitos da moradia rural: não apresentam varandas e espaços para fogão a lenha e a disposição dos ambientes limita a distribuição do mobiliário tradicionais. Os materiais utilizados nas coberturas foram as telhas cerâmicas com estrutura de

madeira ou metálica e forro de PVC e laje volterrana com EPS. Quanto à parede, utilizou-se blocos de cerâmico vazados, rebocados com argamassa cimentícia, soluções construtivas que não atendem aos parâmetros térmicos NBR 15220 para a cidade de Mirandópolis em São Paulo, como transmitância térmica e aberturas mínimas (RODRIGUEZ 2016).

Em contraponto a essa produção habitacional descontextualizada da realidade rural, entre os anos de 1963 e 2010, há uma pequena produção de habitações sociais em técnicas vernáculas em terra por todo o território brasileiro. Dentre elas, destacam-se os conjuntos habitacionais Cajueiro Seco, Parque Wall Ferraz, Assentamento Pirituba e Assentamento Sepé Serra Azul, que mostram uma melhor adequação às realidades da zona rural brasileira, em termos de identidade construtiva local, utilizando técnicas de pau a pique e adobe, e adequação térmica, se comparadas à produção habitacional do programa MCMV (ver Figura 3 e Figura 4).



Figura 3 - Casa tipo Cajueiro Seco Acácio Gil Borsoi, 1963. Fonte: (BIERRENBACH 2008).



Figura 4 – Construções de unidades habitacionais em adobe no assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).

Estas tecnologias, até hoje, ainda são utilizadas para as habitações populares, principalmente na região Nordeste do Brasil. Porém, nem sempre apresentam boas qualidades construtivas pelo fato das habitações serem produzidas, em sua maioria, como abrigos improvisados, construídos sem a certeza da permanência por estarem inseridas em propriedades rurais cedidas ou em terrenos urbanos invadidos públicos ou privados (NETO 2013).

Fazendo uma leitura das técnicas da arquitetura tradicional nos permite tomar consciência das diversas formas de adaptação climática de diferentes culturas, assim como encontrar tecnologias de baixo custo com materiais locais (FLORENSA 1989). Ao associarmos as qualidades térmicas das alvenarias tradicionais, taipa de pilão e adobe, revestidas em cal, verifica-se que, em termos de absorvância (α), transmitância (U) e capacidade térmica, podem atender a todos os requisitos das normas brasileiras, a depender das cores adotadas e espessuras das paredes. As paredes em terra apresentam absorvância térmica (α), que varia de 0,2 quando se utiliza reboco de cal, ou a 0,75 quando são revestidas com tinta ou argamassa de terra. Esses valores atendem aos requisitos da NBR 15575, onde se $\alpha \leq 0,6$, então $U \leq 3,7 \text{ m}^2.\text{K}$ e se $\alpha \geq 0,6$, então $U \leq 2,5 \text{ m}^2.\text{K}$. Quanto à transmitância, as paredes variam $U = 1,28$ a $2,54 \text{ m}^2.\text{K}$, a depender das espessuras das paredes,

considerando uma variação média de 17 a 48cm, enquadrando-se nos requisitos mínimos da NBR 15575, onde $U \leq 2,5 \text{ m}^2.\text{K}$. A capacidade térmica é sempre elevada, $CT = 277,76$ a $773,76 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$, em relação aos requisitos da norma, que recomenda $CT \geq 130 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. A capacidade térmica elevada combinada com uma moderada transmitância permite uma boa inércia térmica, estratégia recomendada para climas de elevadas amplitudes térmicas. No caso do Brasil, temos climas quentes e secos que predominam em grande parte do território do Nordeste e apresentam moderadas amplitudes térmicas (ABNT 2005).

As construções tradicionais do Nordeste são maioritariamente construídas em o pau a pique, uma tecnologia que se disseminou desde o período colonial por todo o território brasileiro (VEADO 2008). O adobe está presente em quase todos os estados como Bahia, Piauí e Ceará (R. CARVALHO 2012), (BRITO 2003), (HELENA and VIOZIOLI 2003), e a taipa de pilão, técnica restrita aos estados da Bahia e Piauí (BRITO 2003). Na atualidade, o adobe e o pau a pique permanecem nas comunidades rurais mais isoladas, com difícil acesso a materiais industriais, principalmente nos Estados do Ceará, Piauí e Bahia. É possível encontrar-se também exemplares de arquiteturas com design contemporâneo, isto é, edificações produzidas por arquitetos e engenheiros explorando novas potencialidades das tecnologias tradicionais em terra, mesclada com materiais industriais. Já a taipa de pilão não é mais produzida por comunidades rurais, só se encontra em algumas obras com design contemporâneo, produzida por arquitetos e bioconstrutores.

Até o final da década de 1970, intensificou-se o uso da alvenaria de adobe em construções populares em pequenas cidades e zonas rurais, principalmente nos estados do Piauí (ALEXANDRIA and LOPES 2008) e do Ceará. Nos tempos atuais, ainda se produz adobe, mas em uma pequena escala nestas regiões. Carvalho (2012), comparando a habitação social em alvenaria de tijolo cerâmico à casa de adobe no estado do Ceará, conclui que uma construção em adobe, se comparada com uma construção tradicional, tende a ser 20% mais barata, considerando somente a alteração dos componentes da alvenaria. A alvenaria de adobe se apresenta mais barata pelo fato de se utilizar do solo local e de mão de obra de autoconstrução para produzir o bloco, eliminando os custos do material para produção do bloco e da argamassa de assentamento. Outro meio de baixar os custos é utilizar madeira nativa na cobertura das habitações em adobe, o que pode reduzir o custo total a 40% (R. CARVALHO 2012).

Por outro lado, no contexto de obras com design contemporâneo, isto é, produzida por arquitetos, engenheiros ou bioconstrutores, verifica-se o uso da alvenaria de adobe no contexto internacional desde a crise energética da década de 1970, devido a suas características de boa inércia térmica (K. HEATHCOTE 2011). No contexto brasileiro percebe-se sua utilização desde a década de 2000, dentre elas dois assentamentos rurais financiados pelo Governo Federal no estado de São Paulo nos anos 2000: Assentamento Pirituba e Assentamento Serra Azul (L. T. PINHEIRO, CARVALHO, and SILVA 2016).

A alvenaria de adobe é um material com moderada condutividade térmica, o que o torna um bom moderador de temperatura, propriedade comum a outros materiais de construção, como alvenaria de pedra e tijolo cerâmico. Em relação à alvenaria de tijolo cerâmico furado, a alvenaria de adobe apresenta uma capacidade térmica bem mais elevada e uma transmitância térmica (U) semelhante. A capacidade térmica mais elevada permite um maior atraso térmico, gerando um maior equilíbrio e conforto térmico em regiões com dias quentes e noites frias. Porém, em algumas pesquisas, verificou-se a importância de interação da alvenaria de adobe com outros sistemas construtivos,

como a cobertura da edificação para garantia de bom conforto térmico. Desse modo, em simulações realizadas para uns dias típicos de inverno e verão no Colorado, verifica-se que quanto maior a espessura das paredes, maior é o seu atraso térmico, considerando espessuras entre 30 a 60cm (REMPEL and REMPEL 2013). O trabalho de Parra-Saldivar and Batty (2006), realizado nas cidades Mexicanas de Baixa Califórnia, Chiapas e Vitória Tamaulipas, constatou que as paredes internas e janelas contribuem para o conforto dos edifícios (PARRA-SALDIVAR and BATTY 2006). O trabalho de Francisco (2009), no Brasil, comprova que o edifício de adobe apresenta o melhor comportamento que a alvenaria cerâmica para a cidade de Serra Azul, na zona bioclimática 04 (FRANCISCO 2009). Porém, em regiões temperadas como na Sardenha, Itália, verificou-se que a cobertura apresenta uma maior influência térmica do que as paredes de uma edificação em adobe (DESOGUS et al. 2014). Deste modo, compreende-se que as habitações produzidas pelo programa MCMV apresentam um baixo conforto térmico, devido a padronização dos projetos sem consideração das variações climáticas do país e a não utilização de materiais locais. Por outro lado, a construção em terra no Brasil para produção de habitações econômicas apresenta um elevado potencial ainda pouco explorado como as possibilidades de poder responder aos requisitos de conforto térmico de habitações em climas tropicais desta tipologia, bem como aos princípios de circularidade:

- A construção em terra ainda prevalece como solução construtiva para população rural em algumas zonas do país;
- Desde a década de 1960, têm-se vindo a produzir alguns conjuntos habitacionais com sistemas construtivos em terra que provam a sua eficácia;
- O adobe é, desde 2020, uma tecnologia normatizada e por isso passível de ser adotada pelo programa MCMV;
- No contexto da habitação rural brasileira, é possível reduzir os custos da edificação a 20% se comparado a alvenaria de adobe com a de tijolo cerâmico;

Estas condições abrem assim a possibilidade de estudo do desempenho térmico destas tipologias em climas tropicais úmidos ou semiáridos, visto que os estudos existentes para este tipo de clima são para , climas temperados e desérticos de alta amplitude térmico.

CONTRIBUIÇÕES

O adobe é uma técnica oriunda do período colonial que ainda permanece nas zonas rurais do estado do Ceará tanto na construção popular como na construção moderna, produzidas por arquitetos e bioconstrutores, em regiões turísticas ou próximas à capital do estado. Em termos econômicos, a alvenaria de adobe pode apresentar custos inferiores às paredes de alvenaria cerâmica, quando se utiliza o solo local (R. CARVALHO 2012). Do ponto de vista térmico e construtivo, o adobe se enquadra nos parâmetros das normas brasileiras, havendo uma norma específica para produção de blocos e alvenarias, a NBR 16814 (ABNT 2020). Porém, se faz necessário aprofundar o estudo do seu desempenho térmico, das potencialidades e limites desta tecnologia para possibilitar a sua adoção em projetos para habitação rural enquadrada no PMVMC. No entanto, para que os arquitetos a possam adotar, é necessário estudar o seu comportamento e definir as regras para a sua aplicação. No contexto científico em particular, são escassos os estudos sobre o comportamento térmico da alvenaria de adobe em zonas tropicais e inexistentes as recomendações para a sua adoção em projetos de arquitetura.

A partir do contexto apresentado, propõe-se nesta pesquisa, estabelecer as regras para o desenvolvimento do projeto de arquitetura das casas do PMCMV em alvenaria de adobe com o objetivo de melhorar o desempenho térmico da habitação. Assim, pretende-se contribuir para o preenchimento de algumas lacunas do conhecimento científico no campo do desempenho térmico das construções em adobe. Desse modo, propõe-se avaliar o comportamento térmico das habitações em adobe em zonas tropicais, no caso o estado do Ceará no Brasil e desenvolver diretrizes bioclimáticas para estes climas para as casas MCMV.

Como problema de pesquisa temos assim a seguinte questão: será possível desenvolver diretrizes construtivas e arquitetônicas, visando o conforto térmico para habitações econômicas em adobe enquadradas no PMCMV, baseando-se em soluções construtivas tradicionais e simulações térmicas?

1.2 OBJETIVOS

De modo a alcançar as contribuições científicas e profissionais para projetos arquitetura para habitações econômicas em adobe enquadradas no PMCMV, foram definidos os seguintes objetivos:

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver diretrizes para projetos de arquitetura aplicados em habitação econômica no padrão MCMV em adobe, com as recomendações construtivas e de conforto térmico para as zonas bioclimáticas do Ceará, Brasil.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender esse objetivo, pretende-se responder aos seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico nas normas e na literatura especializada sobre os parâmetros arquitetônicos e construtivos para edificações em adobe no Ceará;
- Analisar o desempenho térmico de um modelo habitacional padrão MCMV em adobe e tijolo cerâmico nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 do estado do Ceará;
- Avaliar o comportamento de uma modelo MCMV em adobe a partir das variáveis de cores da envoltória, espessuras de paredes e tipos de forro, onde é possível verificar propriedades como absorvância, transmitância e capacidade térmica;
- Definir parâmetros de conforto térmico e construtivo para a habitação em adobe para as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, dentro do padrão MCMV;
- Validar parâmetros de conforto térmicos para as habitações em adobe para as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, dentro do padrão MCMV;
- Desenvolver diretrizes construtivas e térmicas para o desenvolvimento do projeto de arquitetura de habitações MCMV em adobe, com recomendações de proteção térmicas adequadas às zonas bioclimáticas 5, 7 e 8.

1.3 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida em 6 etapas: levantamento bibliográfico, contextualização, caracterização do modelo MCMV, desenvolvimento dos parâmetros térmicos, validação dos parâmetros e recomendações térmicas para habitações em adobe.

Durante a primeira etapa, o levantamento bibliográfico, foi construído o estado da arte da pesquisa, a partir dos seguintes temas: arquitetura em terra no Brasil, construção em adobe e suas condicionantes arquitetônicas, desempenho térmico do adobe. O levantamento de dados foi realizado a partir de artigos, teses, dissertações, normas técnicas e cartilhas. Na etapa contextualização, são expostas informações sobre o contexto climático, construções de adobe e políticas habitacionais para o estado do Ceará. O clima é abordado a partir de parâmetros como temperatura, umidade e precipitação de chuvas e são verificados limites de temperatura máxima e mínima para o conforto de habitações nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 a partir das normas brasileiras. Os dados apresentados sobre as construções de adobe tradicionais e contemporâneas no Ceará foram informações a respeito dos blocos, como granulometria do solo e resistência mecânica, e das edificações, como variações de revestimentos, espessuras de paredes e tipos de coberturas. Os dados sobre as obras contemporâneas foram extraídos de entrevistas com arquitetos e bioconstrutores consultando os seus projetos e obras. Quanto às informações das obras tradicionais, foram extraídas de levantamentos feitos pelos autores (R. CARVALHO 2012), (ALCÂNTARA et al. 2018) e (AMARAL, INGRID, and COSTA 2019).

No desenvolvimento do Caso de Estudo, as políticas habitacionais são caracterizadas a partir da compreensão do déficit habitacional e da atuação do programa MCMV no estado do Ceará para redução deste problema. Dentre as políticas públicas, são catalogadas tipologias habitacionais para a zona rural. A partir dos dados levantados foi realizada a caracterização do modelo, dentro das plataformas Energy Plus e Open Studio, utilizando uma habitação no padrão MCMV com duas tipologias: alvenaria de tijolo cerâmico e alvenaria de adobe, de modo a avaliar o comportamento térmico e o custo de cada uma. Os modelos foram construídos a partir de dois conjuntos de dados: propriedades térmicas dos materiais e arquivos climáticos. As propriedades térmicas dos materiais foram coletadas na literatura, devido à inviabilidade de tempo para a realização dos ensaios e os dados climáticos foram extraídos do site PROJETEE, que apresenta arquivos climáticos de diversas cidades brasileiras, devido à inviabilidade de coleta em campo. A análise dos dados simulados foi feita a partir do método graus-horas de resfriamento, que consiste na somatória da diferença entre a temperatura operativa horária e a temperatura de base, onde é contabilizada a quantidade de graus acima da temperatura de base; na Figura 5, a temperatura de conforto é 26°C. A temperatura de conforto, segundo ABNT (2013), varia de acordo com cada zona bioclimática; este trabalho utilizou-se, então, da análise diária das temperaturas máximas em dias típicos de verão, pois são critério da norma de desempenho - NBR 15575 para validar comportamento das edificações (ABNT 2013). Ainda na etapa caracterização, os modelos foram avaliados em duas tipologias de alvenaria: de adobe e de tijolo cerâmico. Cada uma foi submetida a 4 orientações distintas: norte, sul, leste e oeste, nas três zonas bioclimáticas 5, 7 e 8. Os resultados foram expressos em temperatura máxima de um dia típico de verão e GHR no verão, sendo analisado o comportamento térmico de todos os cômodos.

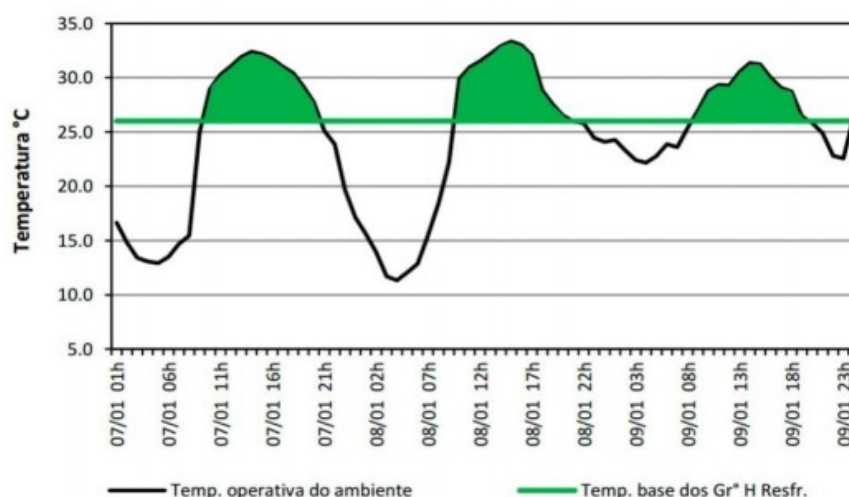


Figura 5 - Gráfico de Graus-hora de resfriamento. Fonte: (LAMBERTS, 2016).

O desenvolvimento dos parâmetros térmicos foi realizado a partir de um modelo de habitação padrão MCMV em adobe situado em três cenários climáticos no Ceará: zona 5, representada por Guaramiranga; Zona 7, pela cidade de Crateús e Zona 8, pela cidade de Fortaleza, todas no estado do Ceará, cidades que possuem construções em adobe e apresentam arquivos climáticos adequados para simulações no Energy Plus. De modo a reduzir a quantidade de simulações, optou-se por avaliar o conforto que apresentou o pior comportamento na pior orientação para depois validarmos os outros cômodos e orientações somente com as variáveis que atingiram o desempenho ideal.

Essa etapa foi dividida em duas fases: análise das variáveis da envoltória e parâmetros térmicos para envoltória. A primeira fase consistiu em analisar o estudo das variáveis arquitetônicas, baseadas nas construções tradicionais em adobe, nos parâmetros MCMV e nas recomendações para a zona bioclimática 5, 7 e 8. Assim, foram realizadas pequenas alterações do modelo e analisadas individualmente cada uma do ponto de vista do desempenho térmico e de custo. As variáveis utilizadas foram os tipos de coberturas, diversificando os tipos de forro e cores, e paredes revezando espessuras e cores. Na segunda fase, parâmetros térmicos para envoltória, selecionou-se as melhores variáveis de cobertura e paredes e realizaram-se combinações entre elas, visando atingir o menor custo e avaliar quais os limites de desempenho térmico. As combinações foram avaliadas nas 3 zonas bioclimáticas. A partir dos resultados, determinou-se os parâmetros dos tipos de coberturas associados aos tipos de paredes.

A etapa validação foi dividida em duas fases: a primeira consistiu em avaliar as combinações dos parâmetros para paredes e coberturas para cada zona bioclimática, utilizando-se o mesmo modelo arquitetônico. Na segunda etapa, foi desenvolvido um novo modelo arquitetônico com 2 dois quartos, gerando uma nova tipologia, e utilizando-se os parâmetros validados na fase anterior para envoltória. Caso os parâmetros aplicados nos modelos não atendessem ao desempenho esperado, retornava-se à fase do desenvolvimento e realizava-se uma revisão dos parâmetros.

Na etapa final, recomendações construtivas e térmicas para habitações econômicas em adobe, são definidas as diretrizes arquitetônicas para construções em adobe para as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, tendo como base o levantamento realizado na literatura sobre as soluções construtivas em adobe no Ceará e as simulações térmicas efetuadas durante a pesquisa. Em resumo, a metodologia pode ser vista abaixo, em um diagrama das etapas que foram desenvolvidas durante esta pesquisa (Figura 6):

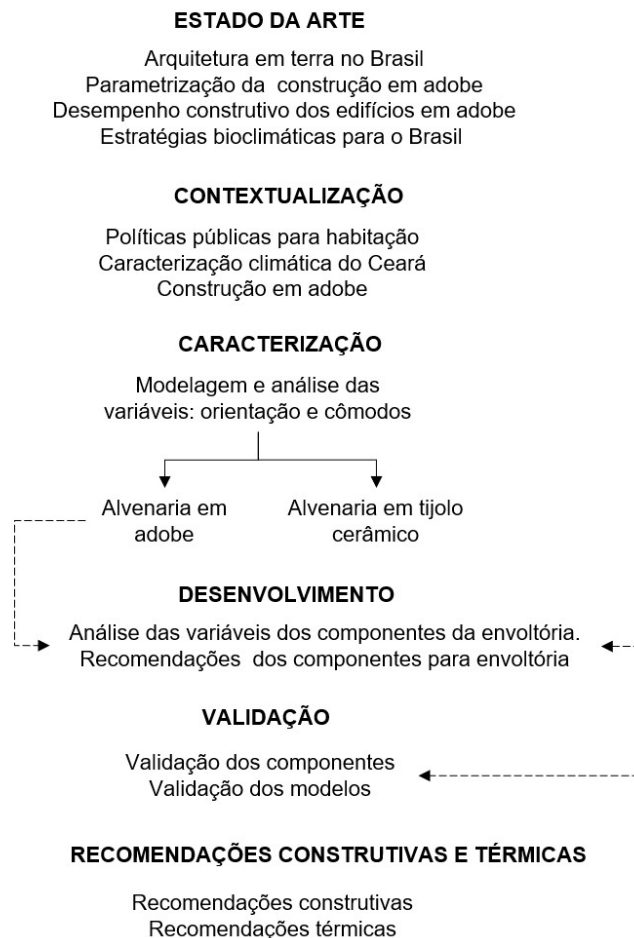


Figura 6 – Diagrama das etapas da metodologia.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O Brasil apresenta 08 zonas bioclimáticas e este trabalho se restringe a trabalhar com as zonas 5, 7 e 8, a partir de arquivos climáticos de três cidades do Estado do Ceará. Os parâmetros avaliados foram somente aqueles recomendados pelas normas brasileiras: orientação e propriedades térmicas da envoltória: absorvância, transmitância e capacidade térmica. Não se trabalhou com a ventilação, pois é um item complexo, tanto que a maioria das plataformas termo energéticas Energy Plus simplifica essa variável no processo de simulação, considerando como constante as renovações do ar durante todo o período de simulação. Em termos de tipologia arquitetônica, foram avaliadas duas tipologias arquitetônicas de habitação econômica

do tipo térrea do PMCMV. A primeira avaliada foi de três quartos, e outra de dois quartos, desenvolvida pelo pesquisador enquadrada no mesmo programa. Não foram avaliadas as variações geométricas como variação do pé direito, forma e área, porque a gama de variações é limitada na habitação econômica, e iria também aumentar o número de variáveis, tornando a pesquisa mais complexa.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A tese foi desenvolvida em 4 capítulos. Capítulo 1, Introdução, já descrito acima, onde abordou-se a contextualização, metodologia e delimitações do trabalho. O capítulo 2 desenvolveu-se o “Estado da Arte”, versa sobre temas como arquitetura em terra no Brasil, realizando uma breve abordagem sobre as origens da construção em terra e sua permanência na atualidade. A seguir, vem “Construção em adobe e suas condicionantes arquitetônicas”, onde são abordados aspectos formais e construtivos, retirados de normas brasileiras e internacionais e trabalhos científicos. Por fim, é apresentado o tema “Desempenho térmico do adobe”, no qual são apresentadas as propriedades térmicas da alvenaria de adobe e o desempenho térmico de edificações em adobe em climas distintos. No Capítulo 3 tem-se o “Caso de Estudo”, onde se apresenta o plano de trabalho experimental, a caracterização dos modelos PMCMV em tijolo cerâmico e adobe, os resultados das avaliações de parâmetros térmicos para habitações em adobe no Ceará, a validação dos parâmetros em outros cenários, assim como os ajustes para refinar o modelo final. Ainda neste capítulo, são apontadas recomendações construtivas e térmicas para habitações econômicas do PMCMV em adobe nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, construídas a partir dos parâmetros desenvolvidos no estudo de caso e recomendações da literatura para o Estado do Ceará, Brasil. Por fim, no Capítulo 4, são feitas as considerações finais, expondo os resultados atingidos pelo modelo e as possíveis contribuições dos trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

A partir do estudo bibliométrico realizado, optou-se neste Estado de Arte por aprofundar a pesquisa nos seguintes temas: arquitetura em terra, construção em adobe e desempenho térmico para habitações em adobe, para responder ao objetivo de desenvolver estratégias de conforto térmico para projetos de arquitetura para habitação econômica em adobe para o Estado do Ceará. Assim, este capítulo se subdivide em 3 subcapítulos: 1. arquitetura em terra, 2. construções em adobe e suas condicionantes arquitetônicas e finalmente o 3. desempenho térmico dos edifícios em adobe. Na Arquitetura em terra no Brasil são abordados temas como construções em terra desde o período pré-colonial aos tempos atuais, apresentando como atualmente arquitetos, engenheiros e bioconstrutores têm revisitado este tema. Num segundo momento, é explorada a construção em adobe e suas condicionantes arquitetônicas em particular aspectos formais e construtivos. No subcapítulo Desempenho térmico dos edifícios em adobe aborda-se com profundidades as propriedades térmicas do adobe e apresenta-se estudos de casos da literatura.

1. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Apesar da terra crua ser um dos materiais mais antigos para construção, é uma das técnicas menos estudadas e menos compreendidas. De uma forma pontual, as propriedades das construções em terra crua vêm sendo estudadas por alguns pesquisadores desde os anos 1970 (ISIK and TULBENTCI 2008), porém, percebe-se uma maior atenção da comunidade científica sobre o tema partir da década de 2000 (PACHECO-TORGAL and JALALI 2012). O crescimento de pesquisas sobre terra como material de construção é motivado principalmente pela crescente demanda de empresas de construção em busca de dados e provas científicas para avaliar e melhorar a riqueza, o conforto higrotérmico e da resistência sísmica dessas construções (MOREL et al. 2013). Como resultados destas pesquisas são desenvolvidas normas para algumas tecnologias construtivas como o adobe, a taipa de pilão e o bloco terra comprimida (BTC) (PACHECO-TORGAL and JALALI 2012). Dentre estas tecnologias somente o adobe pertence a cultura tradicional do estado do Ceará, Brasil, por isso iremos aprofundar os aspectos desta tecnologia nesta investigação.

Mesmo com essa retomada, ainda há poucos estudos sobre o comportamento térmico da construção em terra. No estudo bibliométrico elaborado conclui-se que na sua maioria, os trabalhos científicos desde a década de 1990 têm se dedicado a análise do comportamento estrutural. Poucos têm se voltado para o desempenho térmico, representando apenas 19% dos trabalhos compilados. 50% destes trabalhos tratam especificamente do comportamento térmico do adobe ou do edifício, sendo um único trabalho desenvolvido no Brasil, e o restante em outros países, como Israel, México, Estados Unidos, Itália e Portugal (L. PINHEIRO et al. 2016).

Desta constatação fez-se, um estudo bibliométrico, onde se realizou a caracterização e mapeamento das publicações produzidas nos últimos 20 anos: 2001 a 2021. A coleta dos dados

deu-se essencialmente por pesquisa bibliográfica através de um levantamento sistemático a partir de periódicos eletrônicos da área, indexados no portal da CAPES. A produção científica na área de construção em terra tem crescido nos últimos 20 anos, diversificando-se também o número de países e instituições de pesquisa envolvidos na década de 2000 e uma pequena produção de artigos científicos, assim como uma baixa diversidade de instituições e países. A partir da década de 2010, nota-se um crescimento gradual, chegando ao seu auge nos períodos de 2012 a 2013 como representado no gráfico abaixo. Esta pesquisa considerou uma amostra de artigos de revistas internacionais de 2001 a 2020 (Figura 7).

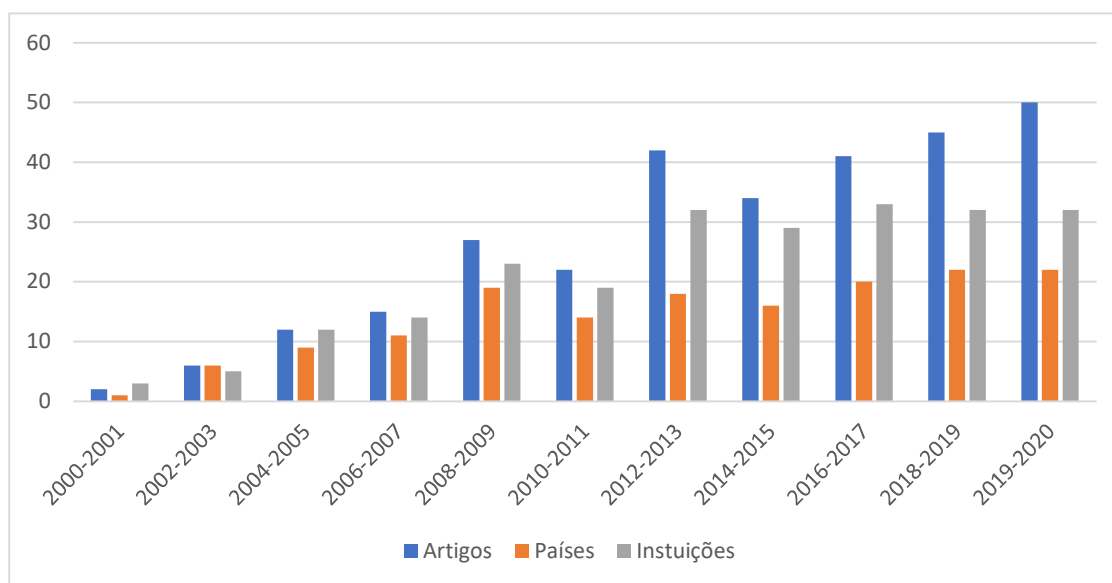


Figura 7 - Comportamento das publicações ao longo dos anos. Fonte: (L. PINHEIRO et al. 2016).

Dentre os temas estudados nos últimos anos observa-se um destaque para os estudos sobre o desempenho dos sistemas construtivos em terra, representando 51,21% do total de artigos (Figura 8). Estes artigos, na sua maioria focam-se no desempenho estrutural e na área de desempenho térmico apenas 19% do total de artigos, o que contabiliza um total de 26 trabalhos que tratam sobre as propriedades higrótérmicas dos materiais de construção em terra. Dentro desta amostra somente 11 se debruçam sobre as propriedades dos tijolos e edifícios de adobe. Durante a leitura destes artigos verificou-se mais 4 artigos não compilados inicialmente, sendo assim o total de 15 artigos sobre o tema.

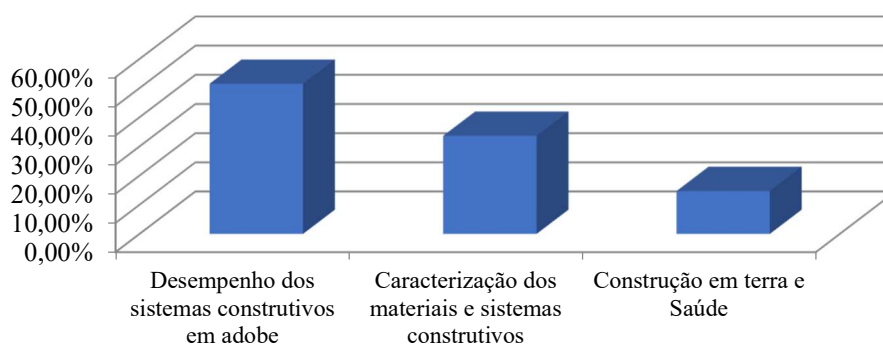


Figura 8 - Percentagem vs total de publicações em cada tema. Fonte: (L. PINHEIRO et al. 2016).

Os trabalhos sobre o comportamento higrotérmico de construções em adobe, através de simulações e monitoramento de campo surgem em diversos países: no Brasil, Francisco (2011); Jordânia, Hamadan (2002) e Heathcote et Keavan (2011); México Parra-saldivar (2006); EUA, Rempel et Rempel (2013) e Rempel et Rempel (2016) e Itália, Desogus et al (2014). Dentre estas investigações, somente uma realiza o monitoramento no campo no caso de Desogus (2014) em Sardenha, Itália. Nestes trabalhos existem muitas sugestões de melhorias ou adequações para determinados climas, que muitas vezes vão além da parede de terra crua, como propostas adequações das coberturas e aberturas. Porém, somente no trabalho de Parra-saldivar (2006), algumas soluções propostas são simuladas em três cidades mexicanas de clima distinta: Chiapas, Baixa Califórnia e Tamaulipas. Existem também estudos de caracterização das propriedades higrotérmicas do adobe, como por exemplo: Brito (2014), Gomes (2015), Guerrero et al (2005), Heathcote e Kevan (2011), Minke (2012) e Meneses (2010). Outra parcela bem menor de investigações, com os trabalhos específicos de Bruno e Faria (2010) e Souza (2016) tratam de soluções bioclimáticas para o adobe. O primeiro apresenta soluções de melhorias para o desempenho térmico de paredes de tabique, propõe adobes e reboco de terra para melhorar a inércia térmica. O segundo cataloga soluções arquitetônicas coloniais com influência muçulmana voltadas para a promoção do conforto térmico. Como pode se observar ainda há poucos estudos sobre o comportamento higrotérmico de edificações em adobe e poucos que tratam especificamente de melhorias para o conforto térmico dessas edificações. Somente a pesquisa de Parra-saldivar (2006) valida as proposições de melhoria da eficiência térmica da casa de adobe em Cidades Mexicanas, que estuda especificamente o desempenho da alvenaria e esquadrias, considerando a influência da espessura da parede, das paredes internas e externas e dimensão das esquadrias.

2. ARQUITETURA DE TERRA NO BRASIL

Dado que a construção em terra impõe uma série de condicionantes ao projeto de arquitetura, não só a nível formal e construtivo, mas também conceptual, optou-se por fazer uma leitura da arquitetura em terra no Brasil, considerando as técnicas existentes, observando seu uso desde período colonial e sua permanência na atualidade com ênfase na habitação económica em terra. Assim, realizou-se uma leitura das técnicas existentes no período colonial e sua permanência na habitação popular. Depois foi realizado um apanhado de obras em habitação económica em terra desde 1960, quando arquitetos e engenheiros se apropriaram do conhecimento tradicional para produzir habitações.

A habitação popular, segundo Hassan Fathy (1990) é forma que o povo expressar suas necessidades funcionais, climáticas e económicas utilizando-se da mão de obra e de recursos locais. A construção de terra faz parte da tradição construtiva brasileira desde os primeiros agrupamentos humanos, e foi-se renovando desde o período colonial com novas técnicas trazidas pelos europeus. Na atualidade, mesmo com a industrialização dos componentes da construção civil, a construção em terra ainda prevalece nas construções populares, produzida pela população de baixa renda em regiões rurais em todo o território nacional. Porém, a ausência de recursos financeiros e a perda das tradições construtivas ao longo do tempo, tendem a tornar estas habitações precárias, expressa no uso de materiais inadequados, como argamassa cimentícias, sobre construções em terra gerando patologias (Fathy 1986).

Vários estudos apontam para a capacidade que a construção em terra tem de fazer uma moderação de temperatura dos espaços interiores, o que poderá ser uma mais valia quando se considera a adoção desta tecnologia em habitação económica rural. Desde a década de 1960, arquitetos e outros profissionais da área, têm trazido para construção “formal” estas tecnologias, fazendo-se necessária a sua normatização a partir dos anos 80 para duas técnicas: bloco de solo cimento e o adobe. Observa-se um interesse crescente de profissionais da construção civil no Brasil para revisitar estas técnicas de modo extrair suas qualidades, seja o baixo custo ou a sustentabilidade, e realizar inovações necessárias de modo a garantir conforto aos usuários.

Como esta problemática tem sido pouco estudada para zonas tropicais, e não existe uma ferramenta de apoio à concepção do projeto de arquitetura com este sistema construtivo, optou-se neste capítulo por fazer uma leitura da arquitetura em terra desde o período pré-colonial até ao período industrial.

2.1. ARQUITETURA PRÉ-COLONIAL EM TERRA

No Brasil 4 tipologias construtivas de habitação de arquitetura indígena em terra: casas de sambaqui, buracos de burgre, tocas e casas aldeias. Todas elas adotavam recursos locais como madeira e palha, malocas, ocas e locas. As casas de burgres eram escavadas na terra e utilizam restos de materiais calcário, como ossos e animais marinhos, nas casas de sambaqui (WEIMER 2014).

Os **Buracos de Bugre** da etnia Aratu e Tupi Guarani, encontrados do Rio Grande do Sul até o Sul de Minas, eram casas semienterradas com profundidades de 40cm a 90cm e cobertas de madeira palha (ver Figura 9). O registro mais antigo é datado de 1750 a.C, pois os indígenas

brasileiros já haviam abandonado estes tipos de abrigo antes da chegada dos colonizadores portugueses (WEIMER 2014).



Figura 9 - Soluções de utilização dos “buracos de bugre” apresentadas por arqueólogos. Adaptado de (WEIMER 2014).

As **Tocas** eram abrigos dentro de cavernas, muitas vezes fechados com palha. Há registros do século XXI, de grupos familiares que habitavam estas tocas no estado do Piauí. Ainda hoje existe um exemplar, a residência da Zabé da Loca, no Piauí (ver Figura 10) (WEIMAR, 2005).

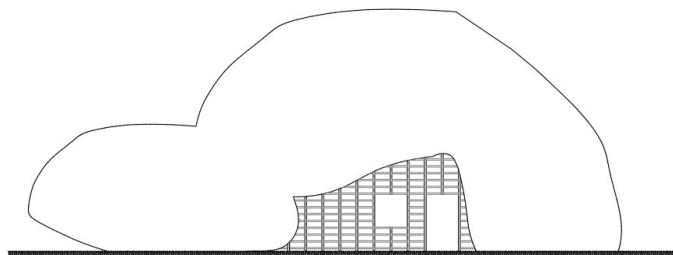


Figura 10 - Morada em toca, residência de Zabé da Loca, Monteiro, Paraíba, Brasil. Adaptado de (WEIMER 2005).

Outra tipologia ainda adotada na região amazônica é a **Casa Aldeia ou Maloca**, adotada pela etnia Tupi Guarani, que ocupou o litoral e o interior do Nordeste. As casas eram abrigos coletivos com geometrias distintas, com larguras de 12m e comprimento que variavam de 150 a 200 metros. Existiam três tipologias com materiais locais como palha e madeira: coberturas com formato de cúpula, telhado de duas águas ou com pátio interno. Os dois primeiros eram os mais comuns, não só nos povos primitivos brasileiros, mas em outros povos da Sibéria e América do Norte (Figura 11 a Figura 14). Já a casa aldeia com pátio interno era algo muito específico dos povos Ianomâmi, habitantes da Amazônia brasileira (Figura 15) (WEIMER 2014).



Figura 11 - Casa Aldeia com cúpula. Aldeia Uaurá, Alto Xingu. Fonte: (WEIMER 2014).

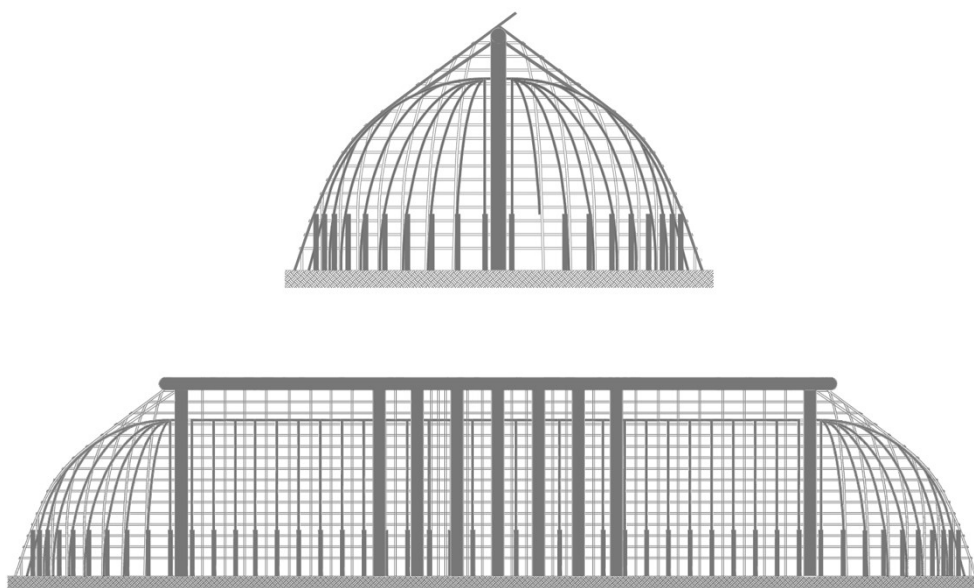


Figura 12 – Corte construtivo da Casa Aldeia com cúpula. Aldeia Uaurá, Alto Xingu.
Fonte: (adaptado de WEIMER 2014).



Figura 13 - Casa aldeia Tucano com telhado de 02 águas, Alto Rio Negro, Amazonas. Fonte: (WEIMER 2014).

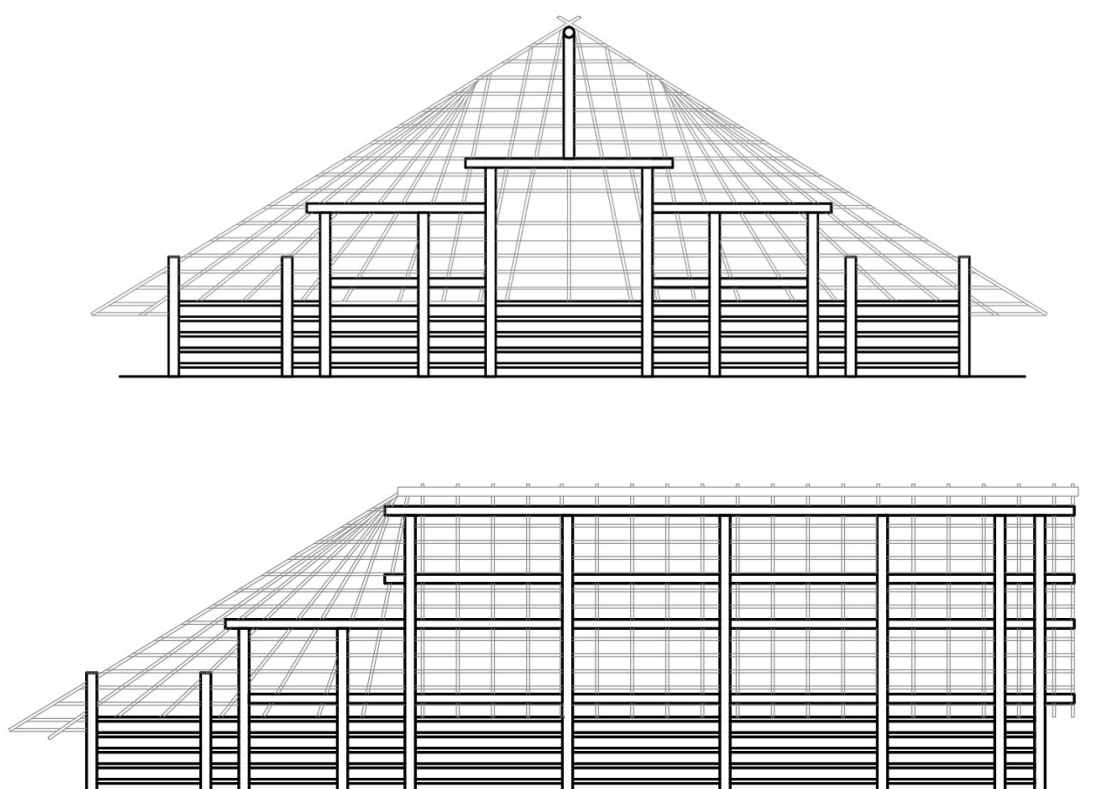


Figura 14 - Cortes da Casa aldeia Tucano com telhado de 02 águas, Alto Rio Negro, Amazonas. Fonte: (WEIMER 2014).

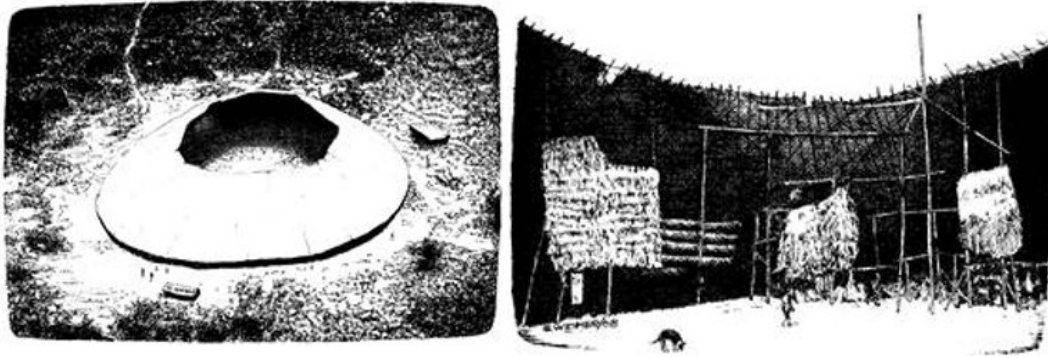


Figura 15 - Casa aldeia Ianomâmi com pátio interno (WEIMER 2014).

2.2. A ARQUITETURA EM TERRA DESDE O PERÍODO COLONIAL ATÉ HOJE

No período colonial, a partir do século XVI, as primeiras habitações, como Mucambos e Casas de Buriti eram edificações modestas feitas com materiais locais, como terra, madeira e palha. Com uma certa homogeneidade geométrica, eram compostas por paredes de terra e cobertura de palha. Ao longo dos anos, as tecnologias foram-se refinando e começaram a surgir no Brasil as paredes de adobe, pau a pique, taipa de pilão e coberturas de telha cerâmica. Neste período marcado pelo domínio europeu, principalmente português, holandês e francês e africano, da mão de obra escrava trazida pelos europeus, mesclaram-se técnicas construtivas entre índios, europeus e africanos. (VEADO 2008).

A **Casa de Buriti** representou um desses exemplares, uma edificação híbrida formada com uma estrutura em madeira de buriti ou carnaúba, cravadas no chão e com paredes e cobertura feitas em palha de buriti. Tinha acesso central à sala, ladeada em uma extremidade pela cozinha e na outra pelo quarto de dormir. De influência indígena, o chão era feito de terra batida, a cozinha interna com um fogareiro feito com três pedras e na zona de dormir eram usadas esteiras para dormir feitas de palha trançadas (ver Figura 16) (WEIMER 2014).



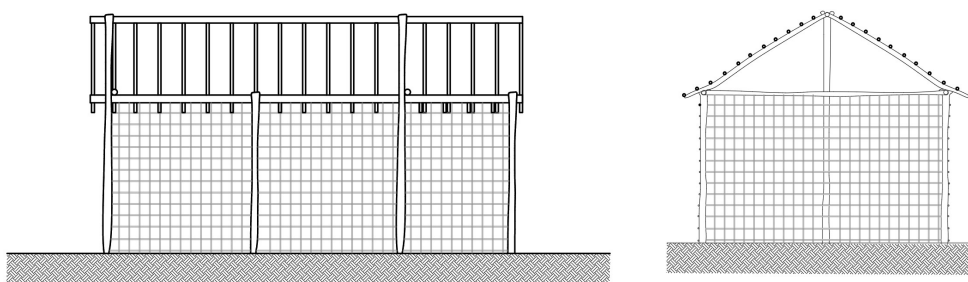


Figura 16 - A casa de buriti das margens do rio São Francisco, em Barra, Bahia. Fonte: (WEIMER 2014).

No período colonial, as técnicas portuguesas mais usuais eram a taipa de pilão, adobe e alvenaria de pedra (RIPPER 2009). No entanto, destaque-se o **Pau a Pique**, segundo Ripper (2009), uma tecnologia com forte influência de matriz africana. Esta técnica se espalhou por todo território brasileiro, principalmente na produção de habitações, pois era de mais fácil execução do que a taipa de pilão. Era mais rápida e econômica, e de fácil adaptação a topografias acidentadas. A técnica consistia em preencher, entre a estrutura, uma vedação de entramado de madeiras com barro. A estrutura era formada por esteios de madeira com seção quadrada ou madeiras roliças não beneficiadas, enterradas no solo a profundidades que variam de 30cm a 50cm, pela continuidade do tronco (denominado nabo). (Figura 17).

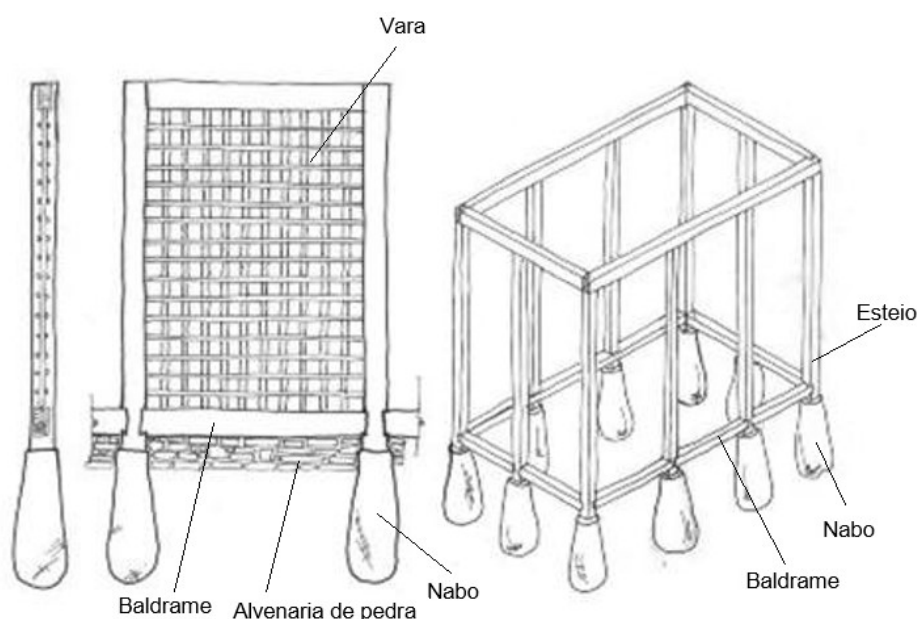


Figura 17 – Esquema de montagem da taipa de mão. Fonte: Adaptado de (VEADO 2008).

A **Alvenaria de Adobe** é uma técnica construtiva composta por adobes, isto é, um bloco composto de terra e água, moldado em formas de madeira e seco ao sol (PARRA-SALDIVAR and BATTY 2006). Na alvenaria de adobe, os blocos são assentes com barro, e revestidos com

reboco de argamassa de cal e areia (COLIN 2010). Dependendo do tipo de solo, caso haja necessidade de estabilização, são adicionadas fibras, argila, areia ou cal (FERNANDES and TAVARES 2016). Para conferir um certo grau de impermeabilidade, utiliza-se cal¹ (VARUM, MARTINS, and VELOSA 2005). Para uma boa resistência à compressão, acrescentavam-se fibras vegetais ou estrume de boi

No período colonial eram produzidos manualmente em fôrmas de madeira com dimensões aproximadas de 20 x 20 x 40 cm, com uma massa de terra e água pisada com os pés e postos a secar à sombra durante alguns dias e depois ao sol (CARIGNANI and DOS REIS 2014). As fundações de pedra eram em canga socada, os blocos assentes somente com argila e pedriscos ou com mistura de barro, cinzas de madeira e estrume de gado. Os rebocos das paredes (com média de 0,26cm de espessura) eram feitos com uma mistura de areia de goma (argilosa) com estrume de gado. Em alguns estados brasileiros, como o Mato Grosso do Sul, há exemplares de casas de adobe construídas na década de 60 do século XX. (COLIN 2010). (ver Figura 18 e Figura 19).

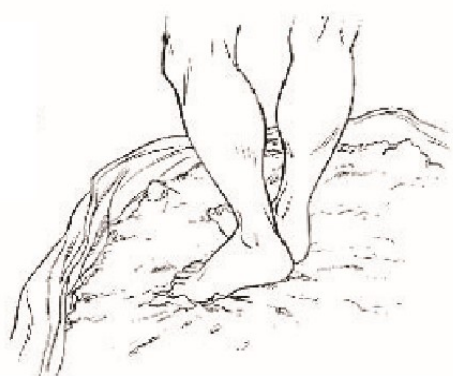


Figura 18 – Preparação da massa do adobe com os pés. Fonte: Adaptado de (CARVALHO 2012)

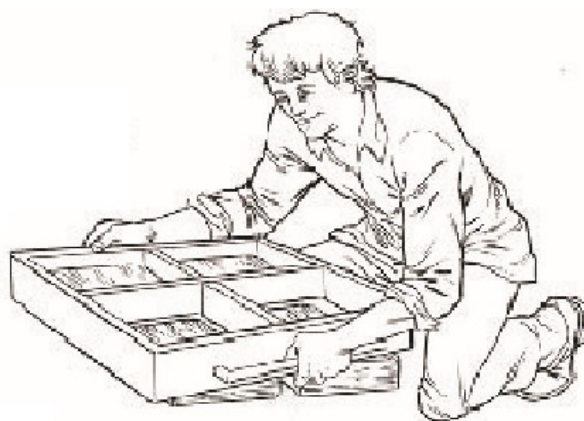


Figura 19 – Desforma do adobe. Fonte: Adaptado de (CARVALHO 2012)

O adobe produzido na atualidade apresenta dimensões bem variadas a depender da região, cujo Oliveira (2005) aponta que a medida mais utilizada no Brasil é a de 10cm x 20cm x 40cm. Contudo, na região de Tiradentes, MG, as dimensões mais comuns são 10cm x 12cm x 25cm e que Silva (2007) relata dimensões de 10cm x 14cm x 28cm em Pirituba, São Paulo, segundo Motta et al. (2004).

A **Taipa de Pilão** é executada com o uso de pilões de madeira para compactar a terra colocada entre formas de madeiras denominadas de taipais (COLIN 2010). Os taipais são constituídos de tábuas laterais ou tampas, pranchas que seguram lateralmente a terra a ser socada. Sobre as tampas fixam-se peças verticais, denominadas costas. Fixadas sobre as costas, as agulhas ou cangalhas impedem que as tampas não se inclinem para dentro. Por fim, o frontal, tábuas colocadas nas extremidades perpendiculares às tampas que fechavam o caixão, determinam a espessura da

¹ Em Portugal era comum a produção de poços feitos de adobe estabilizados com cal (VARUM ET AL 2005)

parede (VEADO 2008). Os taipais têm em média as seguintes dimensões: 1,0 m de altura por 3,0 a 4,0 m lateralmente. A espessura final da parede 0,6 m a 1 m (COLIN 2010) (ver Figura 20). A taipa de pilão, devido a sua robustez e à necessidade de uma mão de obra especializada, era utilizada em casas grandes e edifícios institucionais como igrejas ou fortificações (KANAN, n.d.) e (COMERLATO 1998) (Figura 21).

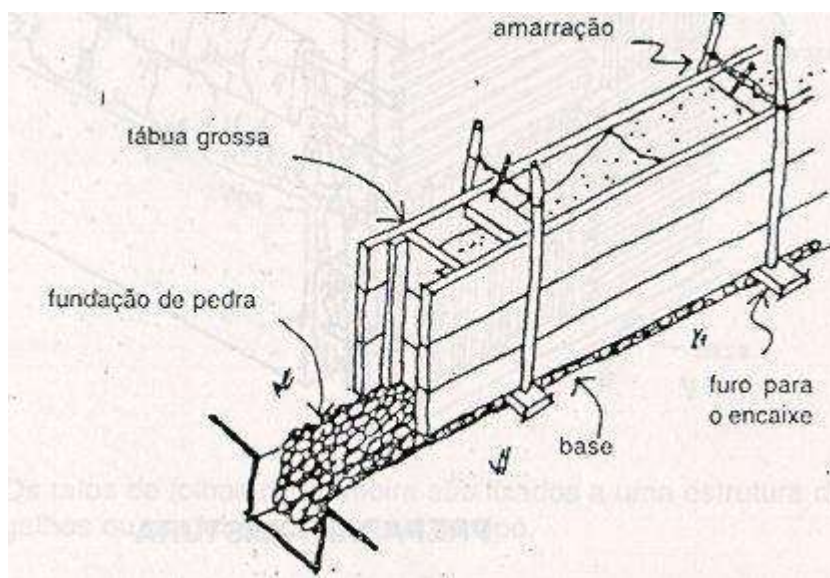


Figura 20 - Esquema taipa de pilão. Fonte: (COLIN 2010).



Figura 21 - Casa de fazenda em taipa de Pilão. Fonte: (KANAN, n.d.).

É forte a presença da construção em terra em todo território brasileiro, com exceção de alguns estados da região Norte. As tecnologias predominantes são:

- i) o pau a pique que se disseminou por todas as regiões brasileiras, principalmente nos estados do Nordeste;

- ii) o adobe, com menos presença que o pau-a-pique, é utilizado em quase todas as regiões;
- iii) a taipa de pilão, mais frequente nas regiões Sudeste e Sul, por apresentarem maior desenvolvimento econômico que as restantes (ver Figura 22).

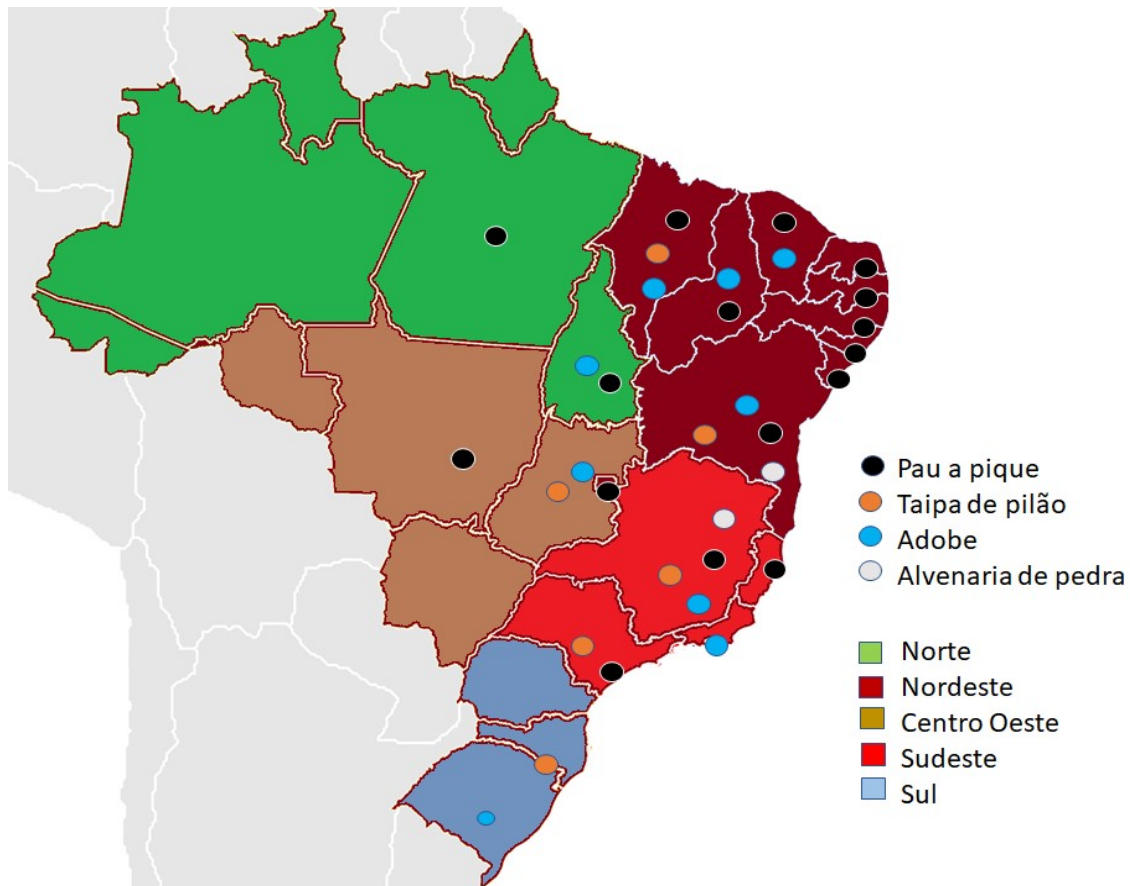


Figura 22 – Mapeamento de construção de terra no Brasil.

Nos tempos coloniais, o adobe e o pau a pique, quando se situavam em zonas urbanas, eram muitos usuais em residências e comércios pela possibilidade de obter alvenaria esbelta. As paredes de adobe eram usuais no primeiro pavimento e o pau a pique no segundo (BENINCASA, DE CASTRO, and BORTOLUCCI 2009). No contexto rural, usavam-se o pau a pique em construções de pouca importância social, como as senzalas, residências ou abrigos provisórios de funcionários e escravos, seja no litoral ou interior (COMERLATO 1998). Estas tecnologias permanecem até hoje em algumas zonas rurais ou em cidades pequenas.

O **Pau a Pique** se disseminou por todo o território brasileiro, mas com menos intensidade na Região Norte, pois na floresta Amazônica ainda se produz a arquitetura indígena feita de madeira e palha. No entanto, em alguns estados da região Norte ainda se encontram exemplos de alvenaria de adobe e pau a pique no estado de Tocantins e taipa de pilão do período colonial no estado do Pará (KANAN, n.d.). Em cidades menores como Icatu e São Luís, no Estado do Maranhão, na

atualidade, ainda se produzem habitações em adobe e pau a pique (BRAGA and NASCIMENTO 2018) e São Luís (FIGUEIREDO et al 2011).

Na Região Nordeste ainda se constroem habitações em adobe, principalmente no Estado da Bahia, especificamente concentradas nas cidades de Rio de Contas, Cachoeira e Lençóis (KANAN, n.d.). No Piauí, localizam-se na cidade de Pedro II (ALEXANDRIA and LOPES 2008), e no estado da Paraíba, na cidade de Princesa Isabel (AZERÊDO, ET AL 2015). No Ceará, estão presentes em diversas cidades (R. M. de Carvalho 2012) como Sobral, Alcântara, Coreaú, Granja, Ipueiras, Marco, Moraújo, Tianguá, Uruburetama, Viçosa do Ceará. No Centro Oeste, há construções em adobe com resquícios do período colonial nos estados de Goiás e Mato Grosso do Sul (KANAN, n.d.) e (CARIGNANI and DOS REIS 2014). Na atualidade, ainda há comunidades que ainda produzem adobe nas cidades de Barra de Bugres e Várzea Grande, no Mato Grosso do Sul (CARIGNANI and DOS REIS 2014).

Na Região Sudeste, a técnica de construção em terra está mais presente nas edificações históricas de igrejas e palacetes em Minas Gerais e Rio de Janeiro como predominância do pau a pique (BENINCASA ET AL 2009) e a alvenaria de adobe (KANAN, n.d.). Nos dias atuais, produzem-se habitações em adobe nas cidades de Lapinha da Serra e Vitoriano Veloso, em Minas Gerais (MOREIRA and REZENDE 2018) e na região metropolitana da cidade de São Paulo (SILVA ET AL 2018). Enquanto isso, na Região Sul, nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, é possível encontrar com frequência a alvenaria de taipa de pilão ou a pedra e cal, principalmente nas regiões costeiras, mais ricas em edifícios de maior importância, como as igrejas, engenhos de azeite e casas grandes, edificações remanescentes do período colonial (KANAN, n.d.) e (COMERLATO 1998).

Com o desenvolvimento industrial do século XIX, abandonaram-se as técnicas construtivas vernáculas nos grandes centros urbanos brasileiros, em particular as produzidas com terra (LE MOS 1985). No ano de 1930, os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro iniciam um processo de modernização e higienização das cidades brasileiras, que culminou na eliminação de inúmeras construções tradicionais em terra. Desde da década de 1970 até os dias de hoje essa política se intensificou a nível nacional e estendeu-se para a zona rural. As habitações vernáculas construídas em pau a pique, consideradas como habitações inadequadas, foram demolidas (DOS SANTOS 2008).

Porém, nas zonas rurais e nas regiões urbanas periféricas, principalmente nos estados do Norte e Nordeste brasileiros, essas técnicas construtivas vernáculas permanecem até hoje e se mesclam com materiais construtivos industrializados (Gunter WEIMER 2014). Nas regiões Nordeste e Centro Oeste é possível encontrar habitações feitas com paredes em adobe e pau a pique com coberturas de telhas cerâmicas, fibrocimento ou palha (GUIMARÃES 2013). No caso das regiões Sudeste e Sul, as paredes são feitas com pau a pique, tábuas de madeira e tijolo cerâmico, com piso cerâmico ou cimento queimado, cobertas com telhas cerâmicas, fibrocimento, palha, folha de flandres com forro de laje maciça ou PVC (CARVALHO et al 2017). Por fim, na região Norte, é usual encontrar construções com as paredes de tábuas de madeira ou palha e coberturas de telha cerâmica ou palha (BARRETO et al. 2010) (ver Tabela 1).

Tabela 1- Técnicas construtivas brasileiras tradicionais na atualidade

Região	Sistema construtivo	Construção tradicional
Nordeste e Centro oeste	Paredes: adobe, pau a pique ou tijolos cerâmicos Cobertura: telhas cerâmicas, fibrocimento ou palha	
Sudeste	pau a pique, tábuas de madeira e tijolo cerâmico Telhas cerâmicas, fibrocimento, palha ou folha de flandres	
Sul	pau a pique, tábuas de madeira e tijolo cerâmico Telhas cerâmicas, fibrocimento, palha ou folha de flandres	
Norte	tábuas de madeira ou palha telha cerâmica ou palha	

Fonte: adaptado de (BARRETO et al. 2010)

2.3. HABITAÇÃO ECONÓMICA RURAL COM TÉCNICAS VERNÁCULAS EM TERRA COMO LIÇÃO PARA A CASA RURAL ATUAL

O governo brasileiro desde a década de 1930 passou a aportar recursos financeiros na produção da habitação social urbana. Na década de 1950, com a intensificação da organização de movimentos rurais pela reforma agrária, o investimento público na habitação rural se resumia ao controle sanitário e manutenção mínima da habitação. Os programas dessa política de saneamento visavam a eliminação de casas de pau a pique, consideradas insalubres, substituindo-as por casas de alvenaria de tijolo cerâmico. Infelizmente, desde da década de 1960 até hoje, o estado de Minas Gerais ainda adota como política pública a demolição das casas de pau a pique, por considerá-las insalubres, e substituídos por habitações em alvenaria de tijolo cerâmico (PROMPT 2012).

No final da década de 1950, Milanez (1958), através do Ministério da Saúde, publicou o documento “Casa de terra: as técnicas de estabilização do solo a serviço do homem do campo”, com intuito de promover melhorias nas casas de terra construídas de forma precária, considerando a questão habitacional rural, como uma política de saúde pública. A publicação tinha por objetivo reunir recomendações de soluções tecnológicas que viabilizassem a construção de moradias saudáveis com a utilização de matéria-prima local: madeira e barro, promovendo a melhoria das habitações em terra, de forma a manter sua salubridade (MILANEZ 1958).

Em paralelo, na mesma época, realizavam-se pesquisas por universidades e ONGs sobre tecnologias tradicionais, como adobe e pau a pique, mesmo com a produção de protótipos de conjuntos habitacionais urbanos e rurais. Estes grupos, contrariando as políticas públicas de combate às técnicas construtivas tradicionais em terra, promoveram a produção de habitações sociais em terra entre as décadas de 1960 e 2010. Produzidas por arquitetos, órgãos públicos, ONGs e iniciativa privada, as obras foram produzidas com baixo custo, respeitando a tradições construtivas e conceitos de sustentabilidade (BIERRENBACH 2008). Nestas obras destacaram-se os cuidados na fase de projeto e execução para evitar patologias, principalmente do ponto de vista da proteção à umidade líquida. As técnicas mais usuais foram pau a pique, adobe e terra ensacada (PINHEIRO, 2016). Até a década de 1990 as universidades e ONGs desenvolveram protótipos e cartilhas de utilização do pau a pique, em sua maioria construídas nos estados do Norte e Nordeste brasileiro (LOPES 1998). A partir dos anos 2000, a produção em terra se expandiu para outros estados, com o uso da técnica de terra ensacada nos estados do Sul e Sudeste.

Durante os anos de 1960 e 1990, no Brasil, a única tecnologia construtiva em terra utilizada para produção de habitações sociais ou protótipos habitacionais foi o pau a pique. Na década de 1960, no Nordeste brasileiro, construiu-se o primeiro conjunto habitacional na cidade de Recife, o Cajueiro Seco. Na década de 1970 desenvolveu-se a produção de protótipos em pau a pique para habitação social na cidade de Fortaleza através do PROAFA, porém este projeto não foi executado. A partir da década de 1980, ampliou-se o número de protótipos e de habitações sociais. Na região norte produziu-se o protótipo habitacional Casa Carajás e no Nordeste um conjunto habitacional financiado pela Caixa Econômica Federal. Nos anos 1990, aumentou-se a produção de habitações sociais, principalmente no Nordeste com a produção de obras como a Casa Serra Azul e Casa Castelinho, no Ceará; Parque Wall Ferraz e Vila Mão Santa e o Protótipo SENAI no Piauí, além de algumas habitações no Sudeste como a Casa do Vigia no Espírito Santo e os protótipos Habitação Social Unidade Social 1 e 2 em São Paulo.

Na década de 2000, o pau a pique entra em desuso como tecnologia para habitação social, pois os construtores adotaram novas técnicas com adobe e terra ensacada. Do mesmo modo, ocorreu uma redução da produção de obras na região do Nordeste. A única produção de habitação social Nordeste foi o Projeto Ilha Grande Paulino, no Piauí, produzido em terra ensacada e adobe. As demais obras foram assentamentos rurais no Sudeste, como a Fazenda Pirituba e Assentamento Rural Tiaraju, no interior do estado de São Paulo, habitações produzidas em adobe e, no Sul do país, a Casa Weis e Casa Família Bueno em Santa Catarina e Família Montes no Rio Grande do Sul com habitações construídas em adobe e terra ensacada. Como pode se ver na Figura 15, a habitação social em terra tem se mostrado viável e se apresentou uma possibilidade construtiva desde a década 1960 em todo o território nacional, com técnicas que variavam entre pau a pique, adobe e terra ensacada.

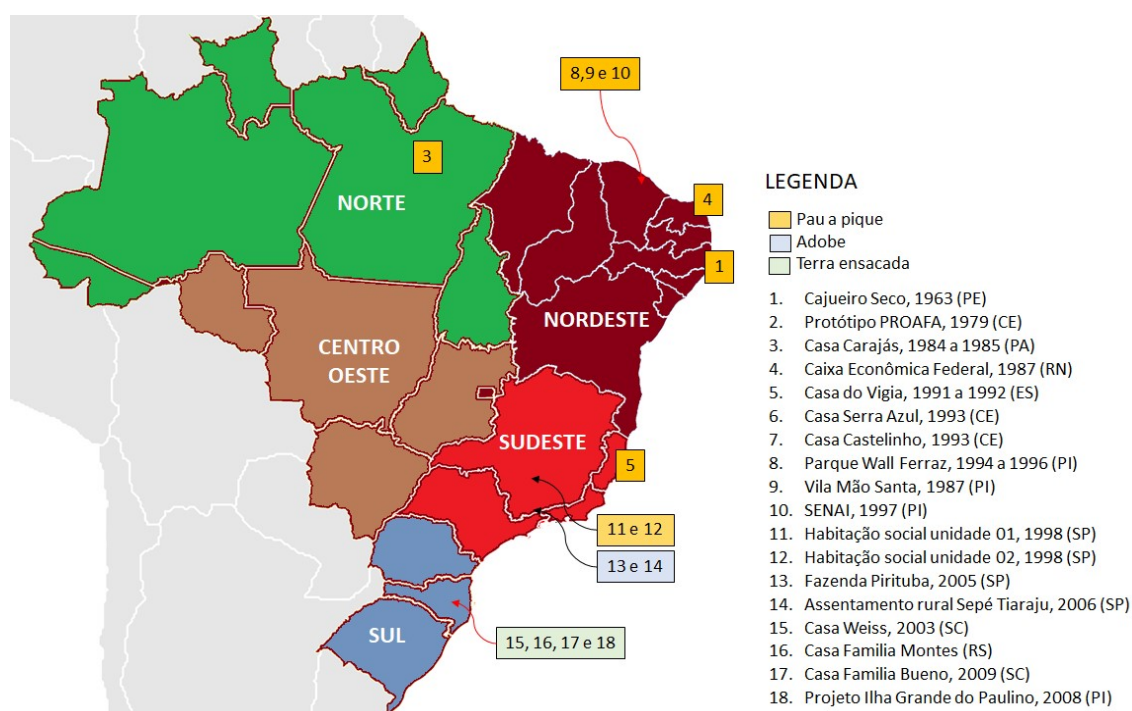


Figura 23 – Mapa da habitação econômica em técnicas vernáculas.

Em 1963, iniciou-se a execução do conjunto habitacional Cajueiro Seco, na cidade de Recife, Pernambuco, obra projetada e executada pelo arquiteto Acácio Gil Borsoi, em pau a pique, em autoconstrução racionalizada. O sistema construtivo das paredes consistiu em painéis de madeira pré-fabricados no canteiro, montados in loco e preenchidos com barro e rebocados com cal. A pré-fabricação acelerou o processo artesanal, garantindo qualidade à obra, como firmeza na estrutura e prumo das paredes, oferecendo bom acabamento. Por fim, as paredes eram cobertas com fibra vegetal, palha de carnaúba (ver Figura 24 e Figura 26). Em 1964, com a instauração do regime militar, as execuções dessas obras foram paralisadas e as habitações do conjunto habitacional foram parcialmente executadas (BIERRENBACH 2008).

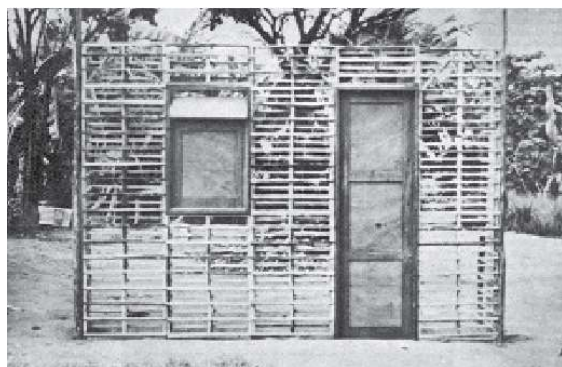


Figura 24 – Pannel de pau a pique pré-moldado, Cajueiro Seco, Acácio Gil Borsoi 1963. Fonte: (BIERRENBACH 2008).



Figura 25 - Casa tipo Cajueiro Seco Acácio Gil Borsoi, 1963. Fonte: (BIERRENBACH 2008).

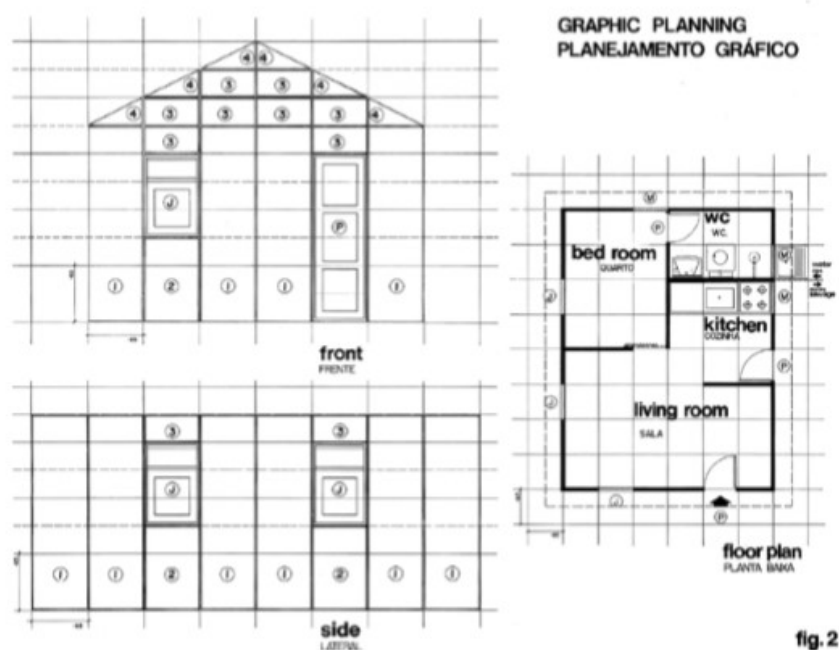


Figura 26 - Planta projeto Cajueiro Seco, Acácio Gil Borsói, 1963. Fonte: (SOUZA and BEJA 2010)

Na década seguinte, ainda na ditadura militar, as políticas de reforma agrária avançaram para ações de combate à doença de Chagas com políticas de substituição de casas de pau a pique por tijolos cerâmico. Em 1975, o combate à doença de Chagas, iniciado no Estado de Minas Gerais, tornou-se uma política nacional. O Ministério da Saúde, através da Fundação Serviço de Saúde Pública (SESP), implantou o “Programa de Melhorias das Habitações Rurais para o Controle da Doença de Chagas”, que visava realizar melhorias das casas de pau a pique. O projeto apresentava duas ações: na primeira, propunham-se borrifações de inseticidas nas casas infestadas em toda a área endêmica e depois a melhorias habitacionais, como restauração dos rebocos das paredes ou

a inserção de reboco nas paredes rebocadas. Porém, devido ao elevado custo das melhorias, o mesmo foi executado apenas em uma área restrita, atendendo assim, a uma pequena parte da população das áreas endêmicas (SILVA 2000).

Enquanto isso, em 1978, foi desenvolvido pela prefeitura municipal de Fortaleza, no estado do Ceará, um protótipo de habitação social em pau a pique, através da Fundação Programa de Assistência Às Favelas da Região Metropolitana de Fortaleza (Proafa). O protótipo apresentava paredes compostas de madeiras nativas, argamassa de terra, chapisco de impermeabilização até 50cm, rebocado com cal cimento e areia e as coberturas em telha cerâmica, conforme os detalhes da parede na Figura 27 . O protótipo foi projetado pelos arquitetos Regis Freire e Brandão. Porém, não chegou a ser executado por falta de interesse da população local (LOPES 1998).

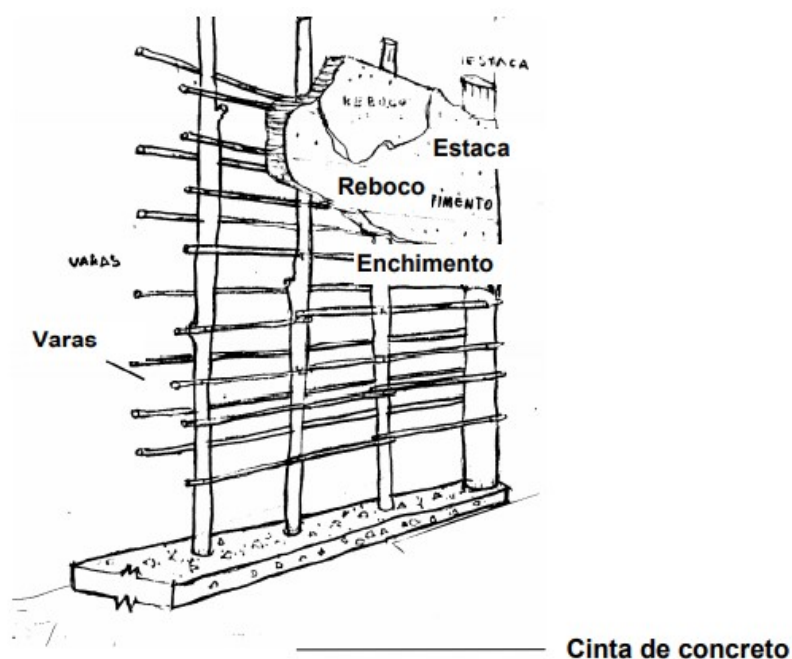


Figura 27 - Detalhe da parede em taipa de mão. Fonte: (LOPES 1998).

Durante a década de 1980, com o fim do regime militar com a abertura democrática. Os conflitos no campo pela reforma agrária foram retomados, quando foi criado o PNRA: Plano Nacional de Reforma Agrária (RODRIGUEZ 2016). Ao mesmo tempo, retomou-se as construções de novos conjuntos habitacionais em terra e foram produzidas novas cartilhas sobre esta técnica construtiva, financiadas pelo poder público, como a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPQ) e o Ministério de Habitação, Urbanismo e Meio Ambiente.

As cartilhas foram produzidas por institutos em parceria com o poder público e apresentaram recomendações para garantir uma boa qualidade e durabilidade das casas de pau a pique, como soluções para impermeabilização das fundações, estrutura de madeira e reboco. Se diferenciavam enquanto método construtivo. A cartilha Transferência de tecnologia em habitação em saneamento explorava o método artesanal tradicional e o outro um processo de pré-fabricação, no caso a cartilha Taipa em Painéis Modulados.

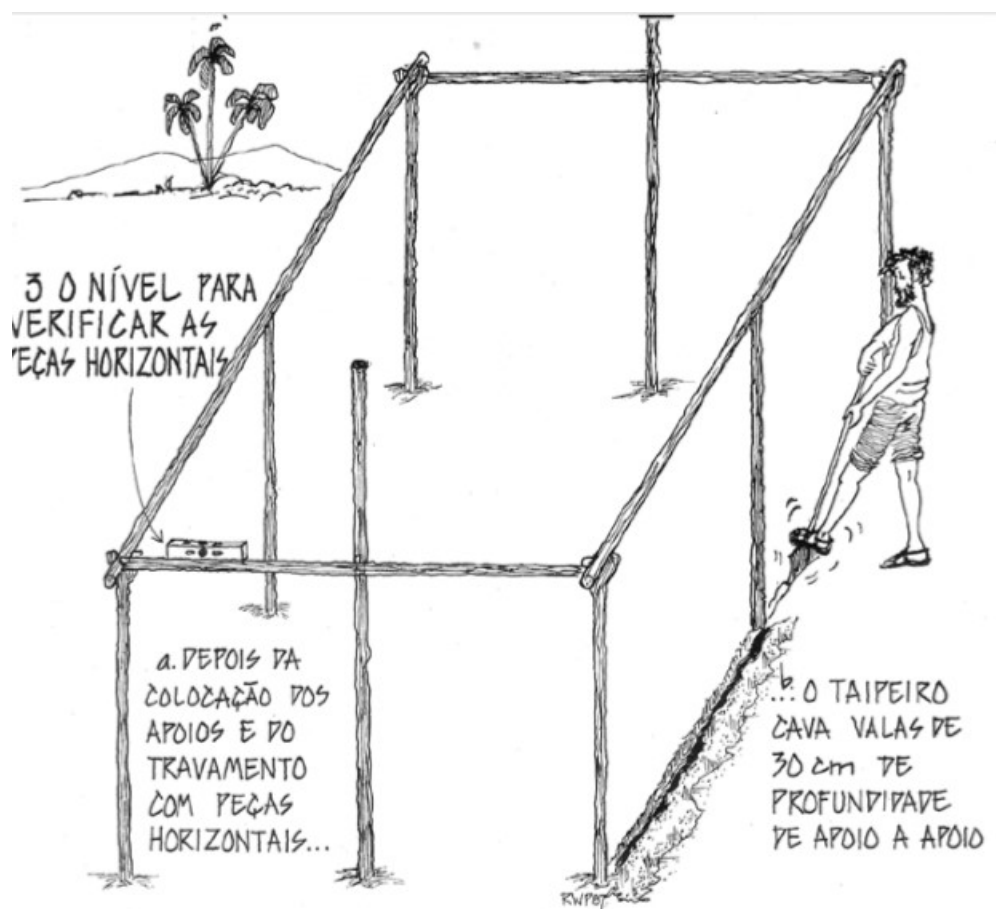


Figura 28 - Trecho da cartilha “Transferência de tecnologia em habitação em saneamento”.

O Ministério de Habitação, Urbanismo e Meio Ambiente, entre os anos de 1984 a 1985, financiou o projeto “Taipa em Painéis Modulados”, que consistiu no desenvolvimento do protótipo Casa Carajás, projetado pela fundação DAM na cidade de Carajás, em busca de construir uma habitação de baixo custo, utilizando tecnologias locais como o pau a pique (ver Figura 29). Após o desenvolvimento do protótipo, gerou-se uma cartilha denominada “Taipa em Painéis Modulados”. O protótipo desenvolvido apresentou inovações no sistema construtivo em pau a pique, com o uso racional da madeira, para a produção de habitação em larga escala e a otimização do processo de autoconstrução. A madeira utilizada vinha do reflorestamento e constituía diferentes painéis: cego, porta, janela, janela alta e empena (Figura 30). Estes poderiam ser construídos fora do canteiro e transportados para a obra para serem montados e posteriormente barreados (Figura 31). O protótipo era uma habitação de 37,60m², composta por cozinha, sala, banheiro e dois quartos, feita de painéis de madeira em barro, revestidos com reboco de cal (MELLO et al. 1985).



Figura 29 - Casa Carajás. Projeto: Fundação DAM. Carajás Pará, 1985. Fonte: (MELLO et al. 1985).



Figura 30 - Processo construtivo de Casa Carajás. Projeto: Fundação DAM. Carajás Pará, 1985. Fonte: (MELLO et al. 1985).

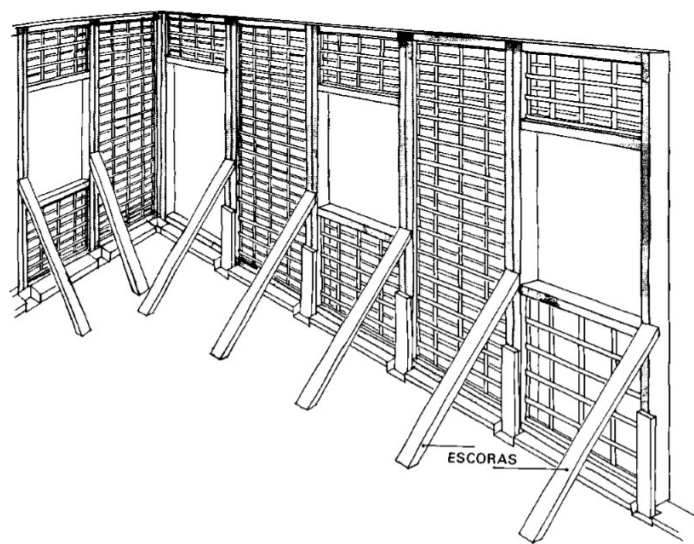


Figura 31 - Exemplos de painéis pré-fabricados em madeira para casas de pau a pique (MELLO et al. 1985).

Em 1987, a Caixa Econômica Federal, financiou a construção de casas em pau a pique na cidade João Câmara, no Rio Grande do Norte, projetadas pelos arquitetos Gaudêncio Torquato e Márcio Machado, sob o regime de autoconstrução. Foram executadas oito tipologias diferentes que variavam de 26,55 a 78,47m², e de 1 a 3 quartos, com varanda e sem varanda, mas todos com sala, cozinha, banheiro e área de serviço (ver Figura 32) (W. LOPES and INO 2000).



Figura 32 - Casas da CEF. Projeto: José Guadêncio Torquato Márcio Machado. João Câmara - RN, 1987. Fonte: (W. LOPES and INO 2000).

Durante a década de 1990, as políticas de combate à doença de Chagas levaram à demolição de casas de pau a pique que se disseminavam a nível nacional (C. G. T. da SILVA 2000), produziam-se novas obras em pau a pique, sejam conjuntos habitacionais financiados por prefeituras ou órgãos federais ou protótipos produzidos por ONGs e universidades públicas. Dentre as obras desenvolvidas, destacaram-se a Casa do Vigilante e os conjuntos habitacionais Parque Wall Ferraz e Vila Mão Santa. Um exemplo é a Casa do Vigilante, construída entre os anos de 1991 e 1993, pela Companhia Vale do Rio Doce em sua Reserva Florestal do estado do Espírito Santo. Projetada pela arquiteta Karla do Carmo Kaser, a casa possuía uma área de 52,20m² dividida em 3 quartos, sala, cozinha, banheiro e varandas. Os materiais utilizados foram painéis de pau a pique, madeira, argamassa de terra do local, reboco de cimento areia e terra e cobertura em telha cerâmica (ver Figura 33).



Figura 33 - Casa do vigilante, 1993. Fonte: (LOPES 1998).

O Parque Wall Ferraz foi um projeto de reassentamento de 900 famílias de uma área de risco de zona alagadas, no Piauí. Entre os anos de 1993 e 1996 a prefeitura municipal preparou os lotes urbanizados e doou material para a autoconstrução de casas de pau a pique com 36m², como telhas cerâmicas e madeiras roliças (ver Figura 34 e Figura 35). No entanto, as habitações foram produzidas sobre regime de autoconstrução sem assistência técnica, gerando má qualidade em algumas habitações.



Figura 34 - Unidade habitacional do Parque Wall Ferraz, 1996. Fonte: (LOPES 1998).



Figura 35 - Parque Wall Ferraz, 1996. Fonte: (LOPES 1998).

A Vila Mão Santa foi construída em pau a pique na cidade de Barras, em 1994, pelo governo municipal com recursos do Governo Federal. Na sua construção utilizaram-se madeiras nativas nas paredes, depois preenchidas com barro e pedra (como é o costume na região) e na estrutura das cobertas, revestida com telha cerâmica ou palha. (Figura 36) (LOPES 1998).



Figura 36 - Vila Mão Santa, 1994. Fonte: (LOPES 1998).

Na década de 1990, desenvolveu-se em protótipos com 1 a 3 pavimentos, a Casa do Nilo, Casa Serra Azul, Casa Castelinho, a Nova Casa de Taipa, e a Habitação Social 1 e 2. Testaram-se algumas inovações construtivas, além do pau a pique.

Em 1991, foi construída a Casa do Nilo, protótipo desenvolvido pelo arquiteto Zanine Caldas em São Gonçalo, no Rio de Janeiro, com 50m². Utilizaram-se sobras de madeira de pequenas serrarias para as vedações em pau a pique e para a cobertura cerâmica. Em termos de implantação, a casa era suspensa do chão com pilares de tijolos cerâmicos para evitar o contato direto com a umidade do solo (LOPES 1998) (ver Figura 37).

O protótipo Casa Castelinho foi construído em Fortaleza, Ceará, no ano de 1993. Uma habitação de 2 pavimentos com uma área total de 68m², dividida em sala, cozinha e banheiro no térreo e 2 quartos no andar superior. Adotaram-se duas técnicas construtivas: no andar térreo utilizou-se o

sistema construtivo BENO (uma estrutura de concreto armado com uma vedação feita de placas de tijolos cerâmicos); no andar superior utilizou-se uma estrutura de madeira serrada com paredes de pau a pique feitas em um traçado de bambu e barro com fibras naturais e a cobertura foi feita em telhas cerâmicas em estrutura de madeira (LOPES 1998) (ver Figura 38).

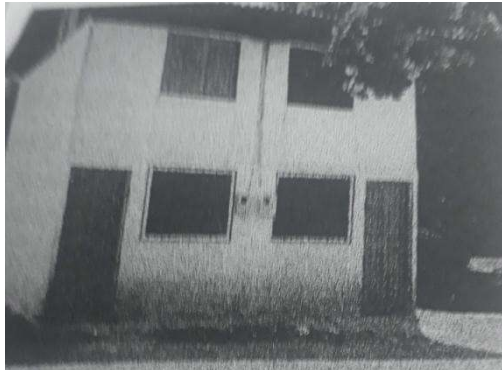


Figura 37 – Protótipo Casa Castelinho, Fortaleza, Ceará. 1993. Fonte: (LOPES 1998).

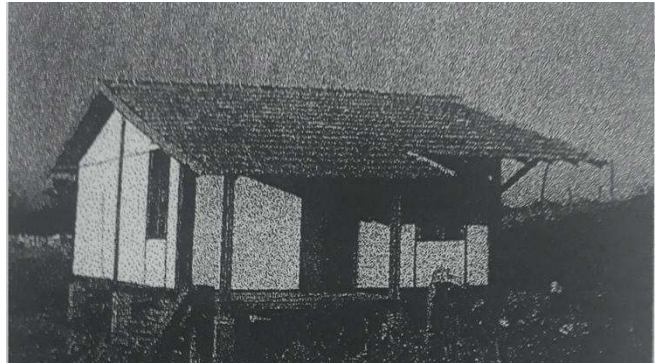


Figura 38 – Protótipo Casa do Nilo, São Gonçalo, Rio de Janeiro. 1991. Fonte: (LOPES 1998).

A Casa Serra Azul, um protótipo residencial com 40 m², composto por dois quartos, sala, cozinha, banheiro e varanda foi construído em 1993, em Maracanaú, Ceará. A sua estrutura era composta de madeira serrada e o fechamento, quase todo, com painéis de bambu e barro misturados com palha, com exceção das áreas molhadas, onde foram usados tijolos cerâmicos, cobertos por telha também cerâmica (ver Figura 39 e Figura 40). O protótipo foi desenvolvido a partir de uma parceria da ONG Gret Urbano Brasil (atual CEARAH Periferia) e o órgão público estadual Companhia de Habitação do Estado do Ceará (COHAB-CE). O projeto arquitetônico foi realizado de forma participativa dirigido pelos arquitetos Alain Hays e Silvia Matuk. Atualmente o protótipo abriga a sede de Associação de Moradores de Maracanaú (LOPES 1998).



Figura 39 – Residência Serra Azul (LOPES 1998).



Figura 40 – Residência Serra Azul, vista interna (LOPES 1998).

O NEPHU (Núcleo de Estudos e Projetos Habitacionais e Urbanos) da Universidade Federal Fluminense, em parceria com a Universidade de Konstanz, Alemanha, construiu uma casa piloto

na comunidade Moran Pequeno em Niterói no ano de 1995. O protótipo foi feito de taipa de mão com bambu, autoconstrução (LOPES 1998).

A Nova Casa de Taipa executada em 1997 na cidade de Bayeux, Paraíba, foi um protótipo de 40 m² financiado pelo SENAI (Serviço Nacional da Indústria) e pela Prefeitura de Bayeux, com intuito de difundir as potencialidades do sistema construtivo pau a pique (também conhecida como taipa de mão) com as devidas melhorias. O protótipo foi construído durante um curso de construção civil do SENAI para formação de mestre de obras no curso de construção civil. O protótipo foi construído com a estrutura (vigas e pilares) de madeira nativa roliça, sendo a base dos pilares revestidas de emulsão asfáltica. As paredes foram feitas com trançado de madeiras nativas, preenchido com argamassa de terra e coberto com telha cerâmica Figura 41 e Figura 42 (LOPES 1998).



Figura 41 - Construção em Bayeux, PB, no ponto de receber o entramado. Fonte: (LOPES 1998).

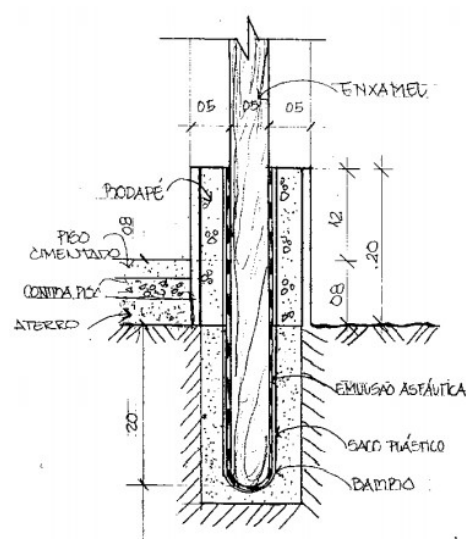


Figura 42 - Detalhe de colocação dos paus a pique. Fonte: (LOPES 1998).

No ano de 1998, o grupo de pesquisa HABIS da Universidade de São Carlos, São Paulo, construiu dois protótipos de habitação social, ambos com área de 50 m² e 3 pavimentos. Os protótipos possuíam estrutura de viga e pilar de madeira eucalipto, com dois tipos de vedação: blocos de terra palha e painéis de pau a pique pré-fabricados (ver Figura 43) (LOPES 1998).

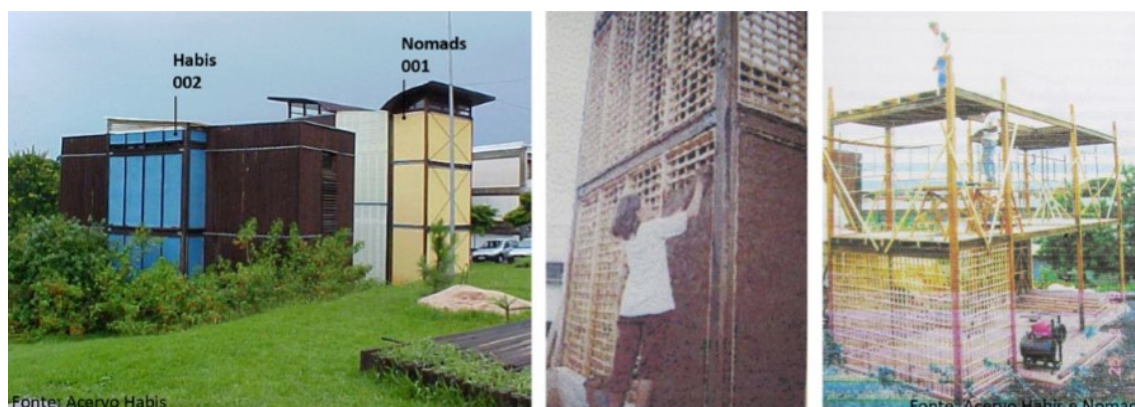


Figura 43 - Protótipos 1 e 2 e atual sede do grupo HABIS, São Carlos, São Paulo, 1997 e 1999. Fonte: (LOPES 1998).

Nos anos 2000, ainda continuaram as políticas públicas de demolição de casas de pau a pique, mas preservando as casas de adobe que estivessem degradadas pela falta de manutenção, com a possibilidade de as recuperar (SILVA 2000). Ao mesmo tempo houve uma evolução dos programas federais de habitação com a criação do PMCMV Rural, inserido no Plano Nacional de Habitação Rural (PNHR). Na sua construção, abandonou-se o pau a pique e permaneceu o uso do adobe, BTC e da terra ensacada.

Pelo meio, o CYTED - Programa Ibero-americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento, dentro do programa PROTERRA, lança em 2005 um documento intitulado Técnicas Construtivas com Terra que compilava uma série de artigos científicos sobre a seleção de solos e métodos de controle na construção em terra (NEVES 2004). O livro nasce da necessidade de abordar e organizar recomendações sobre construção em terra no contexto contemporâneo, considerando que a construção em terra abordada nas universidades latino-americanas tem o foco no patrimônio histórico e restauro. A arquitetura contemporânea é abordada em cursos pontuais de forma pulverizada, fruto do esforço de profissionais. São abordados aspectos construtivos desde a escolha do solo, passando pelo processo construtivo e finalizando com os testes de controle de qualidade de técnicas como adobe, abóbada de terra, bloco de terra comprimida (BTC), taipa de pilão, técnicas mistas e revestimentos. Os autores se dividem entre pesquisadores e profissionais do mercado, sejam estes engenheiros ou arquitetos. (C. NEVES and FARIA 2011).

Superando as dificuldades de utilizar tecnologias não normatizadas, nesta década, o grupo Habis da Universidade de São Paulo construiu dois conjuntos habitacionais utilizando alvenaria de adobe no Assentamento Fazenda Pirituba e no Assentamento rural Sepé Tiaraju. No mesmo período, através do financiamento de órgãos federais como o Ministério do Meio Ambiente, INCRA ou Cooperativas rurais, famílias de agricultores construíram casas em terra ensacada (técnica desenvolvida na década de 1970, que se assemelhavam com a taipa de pilão, empilhando e compactando sacos de ráfia com terra, semelhante a uma parede de trincheira). O grupo Habis, em parceria com a USINA (Centro de Trabalhos para o Ambiente Habitado) projetou e executou 42 unidades no ano de 2005 no assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva, no estado de São Paulo, com recursos do Projeto Inovarural para o financiamento habitacional (SILVA et al 2007.). O projeto contemplou a produção de habitação, melhoramento das condições de infraestrutura e de

saneamento em assentamentos rurais, a partir de um processo participativo da comunidade e a articulação dos diferentes agentes envolvidos nessa cadeia de produção. Utilizaram-se recursos locais, como a terra e madeira, possibilitando a geração de trabalho e renda com a capacitação da comunidade no processo construtivo (SHIMBO and INO 2005). As unidades habitacionais possuem 4 tipologias de projeto, variando de 2 a 3 quartos, 1 sala, 1 cozinha, um banheiro e 1 varanda, contemplando uma área construída de 75m² e área coberta de 106m² e 2 tipologias construtivas: alvenaria de adobe ou em tijolo cerâmico (ver Figura 44 a Figura 47) (SILVA 2007).



Figura 44 – Capacitação da comunidade na produção de adobes no assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).



Figura 45 – Unidade habitacional 3(BQf) do assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).

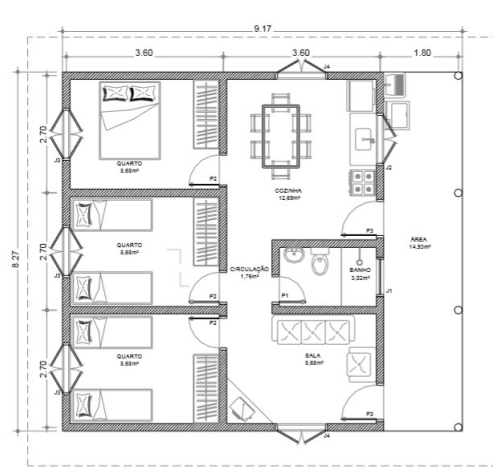


Figura 46 – Planta Baixa da unidade habitacional (3QBd) do assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).

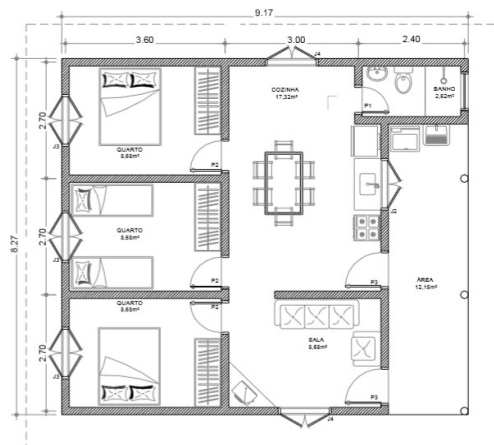


Figura 47 – Planta Baixa da unidade habitacional (3QBf) do assentamento Fazenda Pirituba, Itapeva – SP, 2005. Fonte: (SILVA 2007).

A alvenaria cerâmica foi a escolhida pela maioria dos beneficiários por receio de alguns b construírem em adobe. Os motivos para não construir em adobe variavam entre a não confiabilidade no material

e o oneroso trabalho de produzi-los. Inicialmente, 16 famílias optaram em construir em adobe, pois o Governo Federal, através do banco público Caixa Econômica, só financiava 70% da obra. Outro motivo apontado foi o respeito aos pesquisadores do grupo Habis, que auxiliaram na captação de recursos e apoio técnico. Porém, antes do fechamento do contrato, conseguiu-se que o outro órgão federal, o Instituto da Reforma Agrária e Colonização financiasse os 30% restantes. Com financiamento ampliado, permitiu-se a fácil aquisição do tijolo cerâmico e outros materiais e por este motivo somente uma família construiu sua casa em adobe (SILVA 2007).

No Assentamento rural Sepé Tiaraju, também financiado com recursos do convênio CAIXA/INCRA, iniciado em 2006 e concluído 2010, foram construídas 79 casas utilizando de técnicas construtivas em terra crua, como adobe, BTC (bloco de terra comprimida) e alvenaria de tijolo cerâmico. Os tamanhos das casas variavam de acordo com a necessidade das famílias, existindo três tipologias distintas (ver Figura 48 a Figura 50). A escolha da comunidade pela construção em terra se deu inicialmente por 10 famílias, sendo que no final, somente três construíram de fato suas casas com adobe ou BTC. O número pequeno de pessoas que aderiu às tecnologias em adobe se deu porque durante a execução de algumas alvenarias surgiram patologias e ocorreu o desmoronamento de algumas paredes por causa do não encobrimento durante o período chuvoso e a baixa frequência de acompanhamento técnico (SILVA et al. 2006) (ver Figura 51).



Figura 48: Planta Assentamento rural Sepé Tiaraju, casa 2QC. Fonte: (SILVA et al. 2006)



Figura 49: Planta Assentamento rural Sepé Tiaraju, casa 3QC. Fonte: (SILVA et al. 2006)



Figura 50: Planta Assentamento rural Sepé Tiaraju casa 2QA. Fonte: (SILVA et al. 2006).



Figura 51: Assentamento rural Sepé Tiaraju, Casa de adobe antes e depois do colapso. Fonte: MAIA 2011).

No assentamento rural Sepé Tiaraju, além da terra crua nas paredes utilizou-se um sistema de cobertura adaptado às condições locais, o sistema de cobertura do tipo viga laminada pregada (VLP) composto por madeiras pinus reflorestada; um sistema de tratamento de efluentes utilizando a fossa séptica e o círculo de bananeiras, com auxílio financeiro da FUNASA, bombeamento de água com uso de energia eólica, coleta e armazenamento de água de chuva (MAIA 2011).

No ano de 2003, iniciaram-se experiências de construções rurais sustentáveis realizadas pela Cooperativa de Crédito Rural com Interação Solidária Central SC/RS (CRESOL), uma cooperativa de crédito que financia recursos para a agricultura familiar nos estados de Santa Catarina e no Rio Grande do Sul. Dentre as experiências, destacou-se um curso promovido pelo Instituto de Permacultura e Ecovilas da Pampa (IPEP). A capacitação era voltada para os agricultores de todas as regiões de abrangência do sistema Cresol. Dentre as técnicas utilizadas para as paredes destacam-se: terra ensacada, BTCs e reboco natural, enquanto na cobertura utilizou-se telha cerâmica. Essa experiência impulsionou outros agricultores da região a utilizarem essa técnica em suas novas habitações, (PROMPT and BORELLA 2010) (ver Figura 52 e Figura 53).



Figura 52: Casa Família Weiss, Paial/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010).

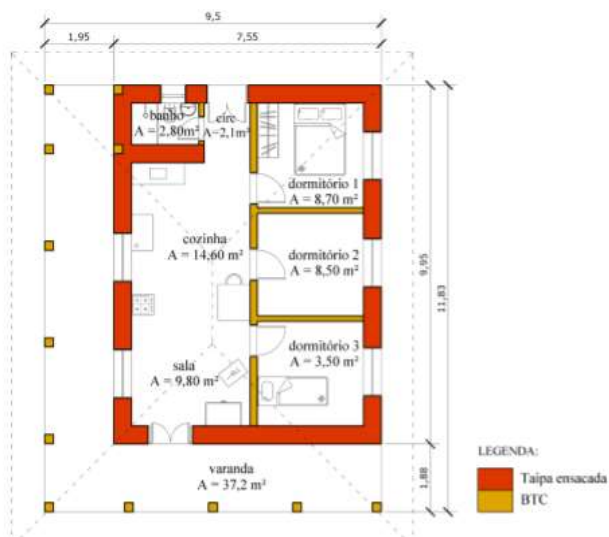


Figura 53: Planta da casa Família Weiss, Paial/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010).

A casa Família Bueno foi construída em 2009 com financiamento do PSH e com auxílio da mão de obra local, fornecida pelo Sindicato dos Trabalhadores na Agricultura Familiar (Sintraf), da Cresol Central SC/RS (CRESOL) e pela mão de obra familiar. As fundações foram feitas com pedra local assentadas com cimento e areia. As paredes externas foram feitas em terra ensacada e rebocadas com terra local com adição de areia. As paredes da área de serviço e do dormitório foram edificadas com tijolos queimados assentes com argamassa de cimento e areia. As divisórias internas foram construídas em madeira. O piso foi realizado de concreto revestido com cerâmica. As esquadrias eram provenientes de demolição e foram montadas no local. A cobertura foi feita em telha cerâmica (PROMPT and BORELLA 2010) (ver Figura 54 e Figura 55).



Figura 54: Casa Família Bueno, Pinhalzinho/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010)

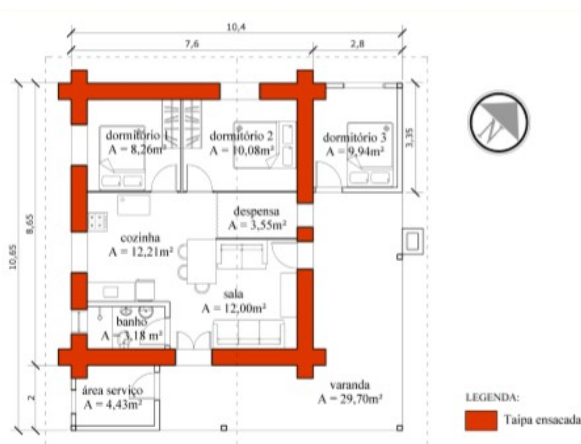


Figura 55: Planta da casa Família Bueno, Pinhalzinho/SC. Fonte: (PROMPT and BORELLA 2010)

Em 2008, ocorreu um curso de capacitação em bioconstrução para 40 famílias na Ilha Grande do Paulino, no Estado do Piauí pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em parceria com o INCRA, através do Programa de Apoio ao Ecoturismo e à Sustentabilidade Ambiental do Turismo (PROECOTUR), promovida pela arquiteta Cecília Prompt. O curso estava inserido em um projeto de apoio ao ecoturismo de base comunitária como alternativa de conservação ambiental e de geração de renda na região, pois a mesma apresenta um grande potencial turístico. A formação tinha por objetivo capacitar a comunidade local em técnicas de bioconstrução e o sensibilizar da comunidade para o uso consciente dos recursos locais na construção de edificações. Deste modo, pretendia-se criar uma referência de construção de baixo impacto ambiental com técnicas de arquitetura e construção adequadas ao clima para valorizar soluções encontradas pelas próprias comunidades, utilizando materiais da própria região, com eficiência energética e tratamento adequado dos resíduos. Durante o curso executou-se uma residência para uma família de pescadores com varanda, sala, cozinha, 2 quartos e banheiro. Quanto ao sistema construtivo, as fundações foram executadas em terra ensacada, a estrutura em madeira, as paredes externas, feitas de terra ensacada, as paredes internas em adobe, a estrutura em madeira de eucalipto e a cobertura com telhado cerâmico. O adobe e cobertura de telha cerâmica já faziam parte da tradição local (PROMPT and BORELLA 2010) (ver Figura 56 e Figura 57).



Figura 56 - Planta Baixa. Fonte: (PROMPT 2008).
Figura 57 - Construção do telhado. Fonte: (PROMPT 2008).

2.3.1. SINTESE

Dos casos apresentados pode ser constatar que as técnicas adotadas para construção das paredes, foram o pau a pique, alvenaria de adobe e terra ensacada. Todos esses materiais apresentam propriedades térmicas semelhantes por serem compostos de terra crua como elemento principal (MINKE 2005). O que pode fazer variar suas propriedades específicas, que são suas espessuras, cores e argamassas de revestimento. Dentre as técnicas de construção em terra, verificou-se na literatura que o adobe é aquele que apresenta mais informações sobre o comportamento térmico. Para as demais técnicas como pau a pique, terra ensacada ou taipa de pilão não se encontram informações suficientes sobre suas propriedades térmicas, como calor específico e condutibilidade térmica, que permitisse o cálculo da transmitância ou capacidade térmica. A

alvenaria de adobe apresenta espessuras que variam de 14 a 25cm, quando as paredes são simples e 28cm a 50cm, quando as paredes são dobradas, o que pode apresentar variações de transmitância térmica 1,25 a 2,54 m².K e capacidade térmica de 280,04 a 773,76 kJ/m².K, valores que se enquadram nas recomendações da NBR 15575, a qual sugere que as paredes apresentem $\alpha \leq 0,6$; $U \leq 3,7$ m².K e $CT \geq 130$ kJ/m².K.

Em termos de coberturas, houve poucas variações e utilizou-se, na maioria dos casos, telhas cerâmicas sem forro e, em casos pontuais, observou-se o uso de cobertura de palha vegetal, soluções comumente adotadas porque apresentam baixo custo. A telha cerâmica, quando adotada sem forro, não atende às recomendações da NBR 15575 para nenhuma região do país, pois apresenta $U = 4,55$ kJ/m².K muito elevado, quando se recomenda que seja $U \leq 1,5$ kJ/m².K.

A construção em terra no Brasil, já era utilizada pelos indígenas, mesmo que forma rudimentar, como nos casos dos buracos bugres. Com a chegada dos europeus e escravos africanos, implantou-se técnicas mais elaboradas com adobe, pau a pique e taipa de pilão. Estas técnicas perduram até os dias de hoje, seja de forma tradicional em produzida por uma habitação de baixa renda em zonas rurais ou com um design mais contemporâneo, produzido por arquitetos e engenheiros desde a década de 1960, quando passaram a revisitar estas tecnologias e trazer inovações. Até a década de 1990 o pau a pique é tecnologia de terra que prevaleceu nas habitações sociais e sendo produzida em cidades das regiões Norte e Nordeste. Nas décadas seguintes o uso do adobe e terra ensacada substituíram o uso do pau a pique. Na década de 2010 foi implantada a norma de adobe e surgiram novos conjuntos habitacionais nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul (Tabela 2).

Tabela 2 – linha do tempo das construções em terra com design contemporâneo no Brasil

1960	1980	1990	2000	2010
1º conjunto habitacional em pau a pique no Nordeste.	Protótipo habitacional em pau a pique no Nordeste.	Protótipos e conjuntos habitacionais em pau a pique no Nordeste e Norte.	1º conjunto habitacional em adobe no Sudeste.	Conjuntos habitacionais em adobe e terra ensacada no Nordeste, Nordeste e Sul.
		Cartilhas e manuais de construção em pau a pique.		Norma de adobe

Desta análise, concluiu-se que ao longo das décadas, o pau a pique, que protagonizou as primeiras obras em terra, tem sido abandonado em detrimento de técnicas como adobe e a terra ensacada. O abandono da tecnologia de pau a pique se deu, segundo Cardoso (2011), pela escassez de madeira, principalmente na região Nordeste (CARDOSO 2011). Quanto ao incentivo do poder público, as obras e protótipos de habitação social demonstram como essas tecnologias estão sendo valorizadas por parte do poder público, o que pode impulsionar a adoção de soluções para a questão da habitação com o uso de recursos locais e naturais.

Na atualidade, a difusão dessas tecnologias esbarra na burocracia dos órgãos públicos financiadores, como Caixa Econômica e Banco do Brasil por não serem normatizadas, com exceção do adobe. O adobe foi normatizado somente em 2019, logo, não há produções em adobe dentro do PMCMV. Durante os 10 anos do programa não se verificou o financiamento de nenhum modelo habitacional em terra, pelo fato de só permitir o uso de sistemas construtivos normatizados. A partir do panorama apresentado, verificou-se que mesmo com 5 décadas de produção de pesquisas, obras e protótipos utilizando terra crua para habitações econômicas no Brasil, há uma pequena evolução no sentido de normatização de tecnologias.

3. PARAMETRIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM ADOBE

O ato de projetar na arquitetura é uma atividade de indução e dedução, visando resolver problemas espaciais. O desenvolvimento de um projeto requer um amplo domínio dos conhecimentos relativos a uma determinada área (KOWALTOWSKI et al). Mahfuz (2007) afirma que os aspectos essenciais da arquitetura são programa, lugar e construção: programa, como as demandas do usuário; lugar, aos condicionantes ambientais e a construção à tecnologia adotada envolvendo mão de obra e materiais (Hall, 2007). A concepção arquitetônica, segundo o RIBA Plan of Work 2020, abrange diversos aspectos do edifício: viabilidade ambiental, econômica e construtiva (JONES, 2020). De forma geral, se faz necessário antes de tudo conhecer a matéria para se construir a ideia, tendo como base o processo construtivo como instrumento de desenho (B. R. CARVALHO 2006). O projeto arquitetônico de uma edificação deve atender uma série de requisitos dos usuários, que abrange aspectos formais e construtivos de uma edificação, atrelados a materiais e técnicas de construção (ABNT 2013). A parametrização é um processo complexo e se inicia com os mapeamentos dos componentes e as interações entre eles. Um meio de otimizar a prática é a parametrização do projeto com suporte em 3 modelos representativos que podem e devem ser adotados em diferentes momentos do processo (DE GRAAF E COWDROY 1999):

- Modelo analógico: o projeto é tratado como espaço de inovação a partir de analogias, principalmente a outras edificações, considerada como a fonte mais rica para a geração de ideias.
- Modelo participativo: A necessidade do envolvimento do usuário/cliente é explorada na tomada de decisão em projeto.
- Modelo da eficiência energética: as soluções de projeto são analisadas com simulações energéticas e enfatiza-se o conhecimento científico-teórico e sua aplicação ao projeto.

Desta parametrização arquitetônica é necessário já nos estágios iniciais de projeto o conhecimento da matéria da construção, de modo a se obter uma melhor compreensão do comportamento do material, desde a sua fabricação ao seu processo construtivo (SHAH, 2000). Quando atrelados a plataformas computacionais, a parametrização de sistemas construtivos tem contribuído bastante para o processo de projeto. No caso do adobe há poucos estudos sobre o tema por ser uma tecnologia antiga, que passou muitas décadas em desuso. Deste modo, nesta tese, foi realizado um levantamento dos aspectos formais, construtivos das edificações e térmicos em adobe de modo desenvolver parâmetros de suporte para os modelos térmicos desenvolvidos no capítulo Estado da Arte.

Através do adobe, podemos produzir paredes e coberturas, mas nesta pesquisa nos restringimos ao estudo das paredes, por ser o uso mais convencional no Brasil e em Portugal. O adobe tem apresentado diversas aplicações em paredes e muros, com muros de suporte de terras ou poços de

água, assim como aplicações em construções diversas: igrejas, casas de espetáculos e residências (VARUM 2008) (Figura 58 e Figura 59).



Figura 58 - Muro com contrafortes.
Fonte: (VARUM et al. 2005)

Figura 59 - Adobe em paredes de poços de água.
Fonte: (VARUM et al. 2005).

A conceção arquitetônica em adobe pressupõe algumas regras que condicionam a formalização do edifício como o número de pavimentos; a espessura de paredes, vãos estruturais distância entre suportes verticais, a formalização das aberturas e mesmo a relação das paredes e outros componentes como fundações, revestimentos e coberturas.

3.1. VOLUMETRIA

A construção em adobe pode ser edificada com alvenaria estrutural e de vedação, ambas apresentam suas limitações formais. A NBR 16814 aponta que a espessura das paredes de vedação deve ter no mínimo 15cm e as paredes estruturais recomendam-se 20cm, quando tiver um pavimento, e 30cm quando tiver dois (Figura 60).

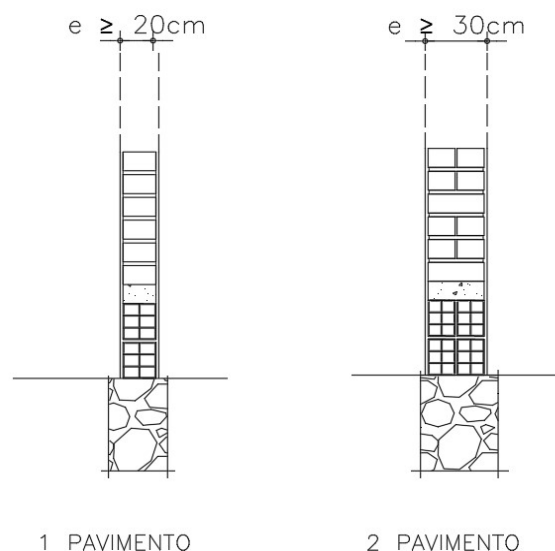


Figura 60 – Espessuras de paredes e números de pavimentos.

No Brasil e em Portugal as construções não ultrapassam os dois pisos de altura (VARUM, 2008). Como exemplo, cita-se a edificação Casa de Campo na cidade de Paulo Lopes, construída no ano de 2016 pelo arquiteto Márcio Holanda (CAVALCANTE 2016) (Figura 61).



Figura 61 - Edificação em adobe com 02 pavimentos - Casa de campo, Brasil, 2016 (CAVALCANTE 2016).

Embora não haja parâmetros de construções de alvenaria estrutural com mais de 2 pavimentos (ABNT, 2020), na cidade de Shibam, no Iêmen, construída no século III, existem edifícios com paredes estruturais em adobe com 5 a 11 andares. A espessura da parede se estreita gradualmente em altura para aligeirar o peso e melhorar a estabilidade (GOMES 2012) (ver Figura 62).



Figura 62 - Construções em adobe na cidade de Shibam, Iémen. Fonte: (GOMES 2012).

3.2. FORMALIZAÇÃO DO VÃO ESTRUTURAL

As alvenarias de adobe, assim como as demais alvenarias, são condicionadas a vãos estruturais curtos, em média de 2 a 4m entre apoios (Costa et al. 2007) (Figura 63).

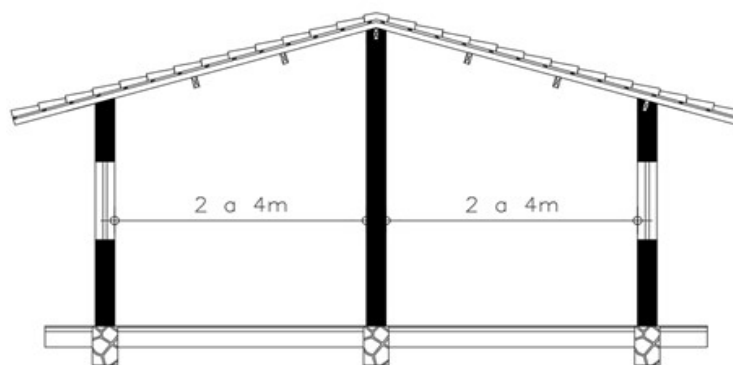


Figura 63 – Limites dos vãos para uma edificação em adobe.

O projeto de 1938 da Creche em Aveiro, Portugal, um edifício com um único pavimento, tem as paredes internas são estruturais que se elevam a até o cumee da cobertura para receber as cargas do telhado e reduzir a dimensão dos vãos. Além de contribuírem para quadriculado estrutural em planta, servem de travamento, “agarrando” as duas paredes com maior desenvolvimento (fachada principal e posterior), conferindo assim maior estabilidade e continuidade estrutural ao conjunto. O uso de uma cinta sobre as paredes recebe o madeiramento da coberta e proporciona uma melhor amarração da alvenaria como demonstrado nas paredes estruturais em vermelho na planta que se segue (RUANO et al. 2010) (Figura 64).

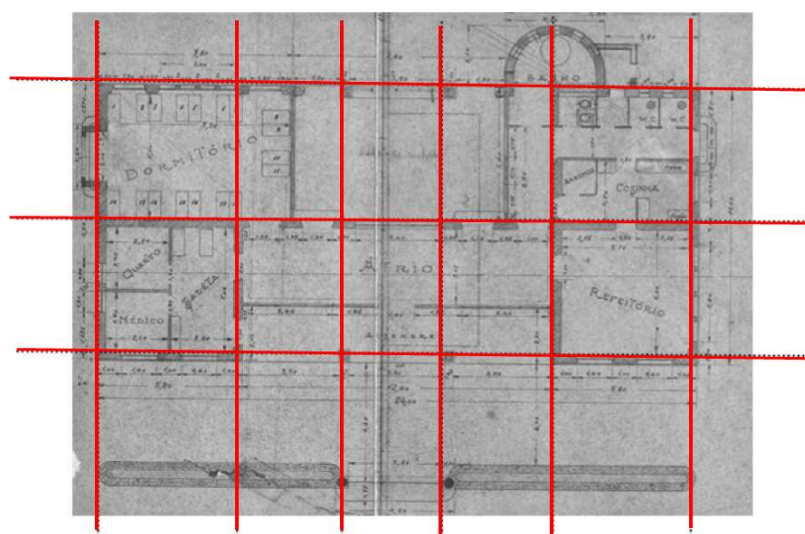


Figura 64 – Planta projeto da Creche, 1938 (RUANO et al. 2010).

3.3. FUNDAÇÃO

As fundações das paredes devem ser compatíveis com a capacidade de suporte do terreno e com as cargas da edificação. Entre a base da parede e fundação, recomenda-se a execução de uma camada de material com altura e propriedades suficientes para proteção contra a ascensão capilar da água, materiais como blocos cerâmicos ou de cimento (ABNT, 2020) (Figura 65).

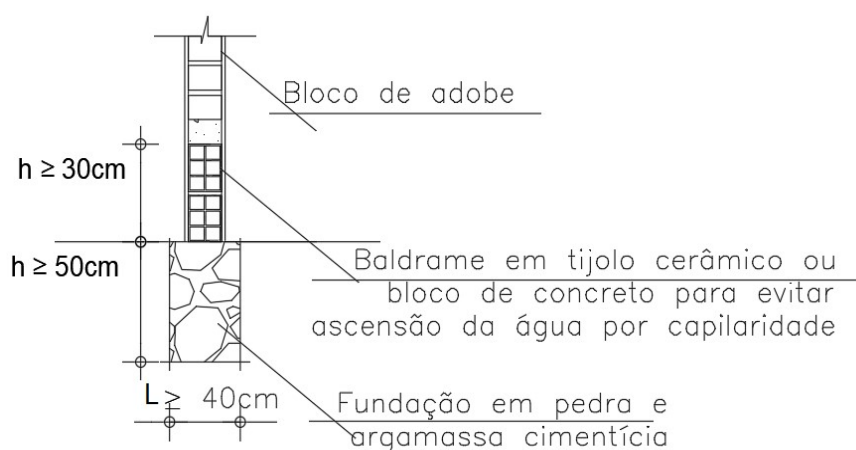


Figura 65 – Recomendações para fundações em adobe segundo a ABNT (2020).

O mau dimensionamento ou ausência de fundações é umas das principais causas do surgimento de manifestações patológicas. Principalmente quando tais fundações são assentadas sobre um terreno instável ou pouco resistente, como solos heterogêneos, sujeitos a dilatações e retrações ou com raízes das árvores muito próximas. Em termos de materiais, deve-se evitar o excesso de areia nas fundações em pedra ou betão ciclópico (VARUM et al. 2005).

Assim, nas construções tradicionais em Portugal, é comum o uso de elementos cerâmicos lajetas de barro vermelho cozido, com espessura de 3,5cm a 4cm aplicados nas interfaces da alvenaria com a fundação, vãos, lajes e telhados, regiões onde a alvenaria sofre mais esforços mecânicos. Em construções mais recentes podem ser encontrados cacos de telhas ou de tijolos maciços, de furação vertical ou horizontal, com 7cm de altura (FERNANDES & TAVARES 2016) (Figura 66).

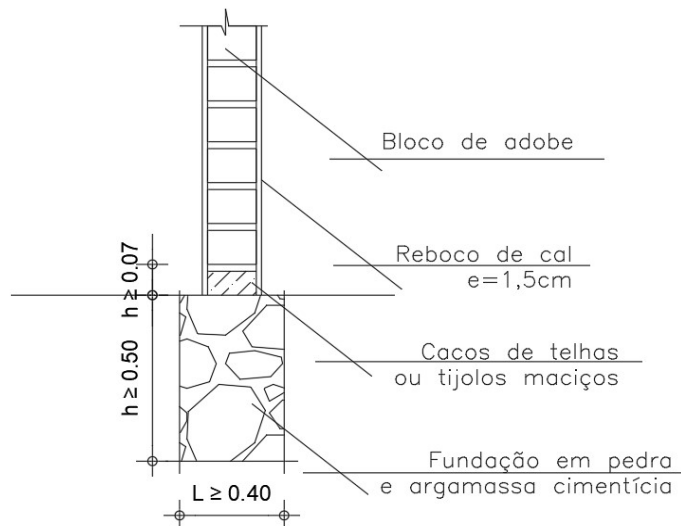


Figura 66 –Detalhes construtivos de fundações em adobe tradicionais em Portugal.

3.4. CINTA

Sobre a parte superior das alvenarias se recomenda o uso de uma cinta, solidária à laje de piso ou de cobertura, que pode estar localizada apenas no topo da parede ou, quando necessário, também em outras posições intermediárias (Figura 67 – cinta de amarração sobre a alvenaria de adobe. Fonte: (M. HOLANDA & RODRIGUEZ, 2013)Figura 67). Quando se tem cargas concentradas nas paredes que não estão aplicadas diretamente sobre as cintas, mas em pontos da alvenaria, devem ser colocadas sobre coxins (Figura 68), dimensionados para receber e distribuir estas cargas, de acordo com a seguinte fórmula (ABNT, 2020):

$$L_c \geq F_d / (t \cdot f_{cad})$$

L_c é o comprimento do coxim, que não deve ser inferior ao comprimento de dois adobes; F_d é o valor de cálculo da carga concentrada, calculado por $F_d = \gamma \cdot F$; F é a carga concentrada atuante no coxim; t é a espessura da parede, sem considerar os revestimentos; f_{cad} é a resistência de cálculo do adobe, dada por $f_{cad} = (f_{cak}/2)$; f_{cak} é a resistência característica à compressão do adobe (ABNT, 2020).



Figura 67 – cinta de amarração sobre a alvenaria de adobe. Fonte: (M. HOLANDA & RODRIGUEZ, 2013)

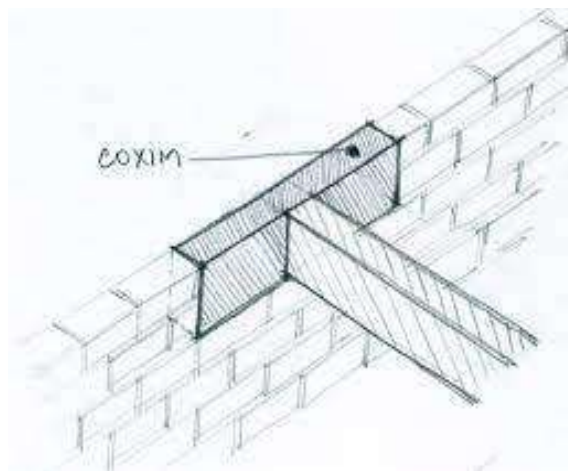


Figura 68 – Coxim sobre a alvenaria de adobe. Fonte: (ABNT, 2020).

3.5. LINTÉIS

Como a alvenaria de adobe apresenta baixa resistência à tração, recomenda-se o uso de lintéis compostos por barrotes de madeira ou elementos de concreto armado sobre os vãos das aberturas (Figura 79) (VARUM 2008). As padieiras sobre vão, quando de concreto armado, devem apresentar valores mínimos de 12cm de altura, podendo ser utilizados apoios com maior espessura de 20cm de altura, de modo a ultrapassar os pontos críticos de concentração de tensões que potencializa a fissuração (RUANO et al 2010). É também possível o uso de arcos de pedra, adobe ou tijolo na configuração das padieiras (VARUM et al., 2005). Em todos os casos, os lintéis ou arcos devem apresentar a mesma espessura das paredes. (ABNT, 2020) (ver Figura 69 e Figura 70).



Figura 69 - Uso de arcos em adobe para vencer os vãos das aberturas. Fonte: (VARUM et al., 2005).



Figura 70 - Uso de barrotes de madeira para vencer os vãos das aberturas. Fonte (VARUM et al., 2005).

3.6. PAREDE

Quanto aos **componentes da alvenaria** como, vergas, contravergas, reboco argamassa de junta, aconselha-se que sejam compostos de materiais distintos do adobe pelo fato de a terra crua não suportar grandes esforços de tração. Assim, os materiais recomendados para vergas e contravergas são madeira ou arcos feitos de tijolo maciço ou pedra. Quanto as argamassas recomendam-se o uso da cal, em ambos os casos se evita o uso do cimento ou concreto armado (FERNANDES and TAVARES, 2016).

O conjunto de blocos, argamassa de junta e reboco que compõem a alvenaria de adobe deve apresentar comportamento homogêneo em termos mecânicos, físicos e químicos, evitando heterogeneidades potencialmente criadoras de focos de degradação. Assim, é fundamental que argamassas e blocos detenham módulos de elasticidade e resistências mecânicas similares. Do mesmo modo, as variações dimensionais ocorridas devido à variação térmica ou absorção de água apresentem a mesma ordem de valores.

3.7. ARGAMASSA

Na escolha das argamassas deve-se averiguar a compatibilidade química com a terra, evitando a deterioração da alvenaria, como é o caso de sais solúveis. Assim, sugere-se o uso de cal ou terra, evitando uso de cimento e impermeabilizantes, pois as paredes de terra realizam trocas de vapor de umidade. A argamassa deve ser composta de cal e areia com um traço de 1:3 sendo

que para a argamassa de juntas, aplica-se um traço de 1:2. Ambas as soluções foram testadas em laboratório na universidade de Aveiro, sendo comprovado o aumento da resistência da parede na sua base/fundação (FERNANDES and TAVARES, 2016).

Quanto a peculiaridades da **argamassa de assentamento**, aconselha-se que seja plástica e tenha consistência suficiente para suportar o peso dos adobes, mantendo o alinhamento e o prumo da alvenaria. Durante sua execução, deve-se preencher completamente o espaço entre a fiada em execução e a anterior, além do espaço vertical entre os adobes de uma mesma fiada. A argamassa não deve exceder 20mm de espessura. Quando os adobe forem vazados, devem ser assentes com os furos alinhados (ABNT, 2020) (Figura 71).

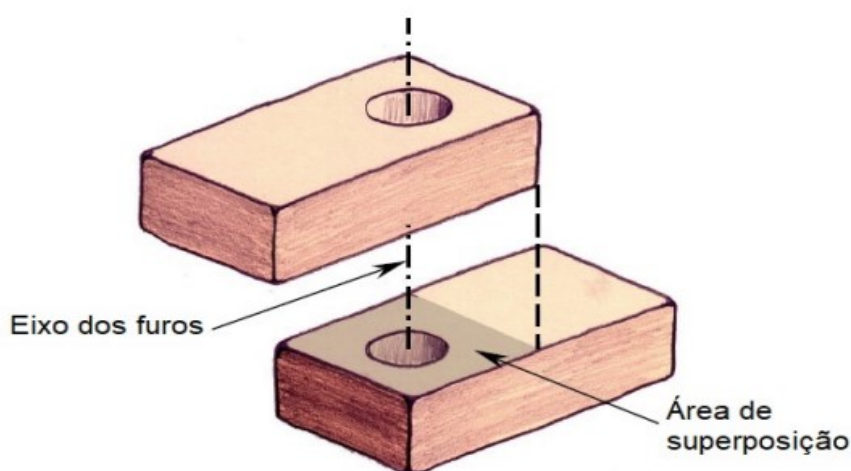


Figura 71 – Assentamento de adobes vazados. Fonte: (ABNT, 2020).

As **argamassas de revestimento** são utilizadas como camada sacrificial, protegendo a alvenaria de adobe (VARUM et al., 2005). A argamassa a base de cal ou terra tem a capacidade de acomodar movimentos, naturais das construções em terra, pois desenvolvem muitas microfissuras que são autorreparadas quando a cal livre se dissolve pela água da chuva (VEADO, 2008).

3.8. ADOBE

O adobe é um bloco composto de terra e água, moldado em formas de madeira ou metálicas e seco a sol (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006), dependendo do tipo de solo há a necessidade de estabilização que pode ser feita com fibras, argila, areia ou cal (FERNANDES and TAVARES, 2016). Há uma diversidade de formas e dimensões dos adobes, podendo ser prismáticos ou trapezoidais, quando aplicados em abóbadas e cúpulas (CARVALHO, 2010). As dimensões do adobe variavam, sobretudo, consoante o uso, sendo de aproximadamente

0,45×0,30×0,15m quando utilizados em casas, e de 0,45×0,20×0,15m, quando utilizados na construção de muros (Varum, 2008). De modo a garantir parâmetros precisos, a NBR 16814 recomenda o uso de adobes com formato de paralelepípedo retangular, sendo permitidos um ou dois furos perpendiculares à face de assentamento, para passagem de tubulações ou grauteamento para reforço estrutural, cujas dimensões devem seguir as seguintes recomendações (ABNT, 2020): (Figura 72).

- comprimento do adobe (C), correspondente à maior dimensão das faces de assentamento, preferencialmente igual ao dobro da largura (L), sendo acrescida de uma vez a espessura da junta vertical de assentamento (j);
- altura do adobe (H), correspondente à distância entre as faces de assentamento, preferencialmente igual à metade da largura do bloco e maior ou igual a 7 cm.
- a tolerância de dimensões médias da amostra para Hm, Lm e Cm, é de ± 5 mm.

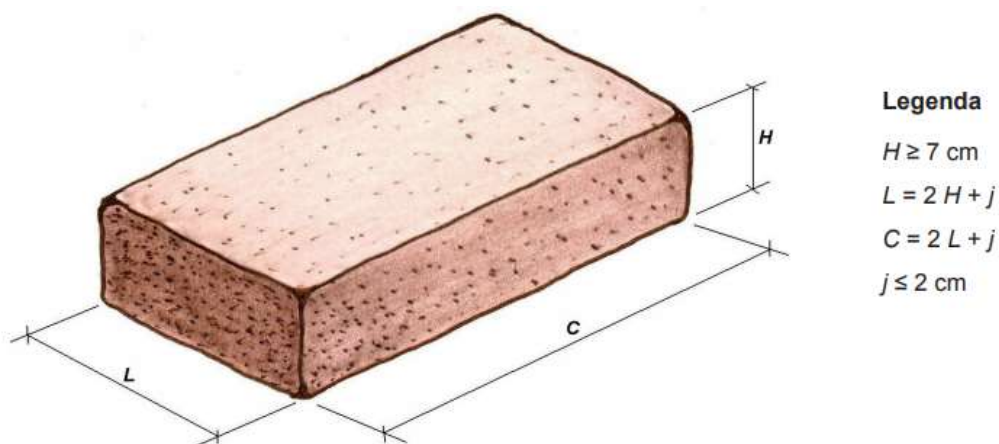


Figura 72 - Parâmetros para dimensionamento do adobe. Fonte: (ABNT, 2020).

Quando houver a necessidade específica de projeto, como por exemplo, o uso de paredes curvas ou paredes com ângulos diferentes de 90° entre si, é possível a produção de adobes com formatos especiais, desde que sejam asseguradas as mesmas características físicas e mecânicas apontadas na NBR 16814 (ABNT, 2020). Quando são utilizados adobes para a produção de cúpulas opta-se por formatos especiais (MINKE, 2005) (Figura 73).



Figura 73 – adobes com formatos especiais. Fonte: (MINKE, 2005)

3.9. SELEÇÃO DE SOLOS

Antes e durante o processo construtivo, deve-se avaliar algumas propriedades do solo para verificar se é viável a sua utilização, obedecendo o faseamento seguinte:

- Inicialmente deve-se fazer a seleção da terra, avaliando as seguintes propriedades: composição granulométrica, plasticidade, retração (NEVES, 2004) e a avaliação da presença de matéria orgânica e sais (J. DELGADO et al., 2007).
- Depois de selecionado o solo adequado, deve-se realizar o controle da execução, avaliando as propriedades como: umidade e grau de compactação (Neves et al., 2010).
- Por fim, não se deve utilizar solos orgânicos (ou contendo matéria orgânica em decomposição) ou com comportamento expansivo (ABNT, 2020).

3.10. GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

O grau de compactação mede a capacidade dos solos de reduzir o seu volume, diminuindo o tamanho dos poros e aumentando a densidade, pela aplicação da força de compactação (DELGADO and GUERRERO, 2006). O grau de compactação de um solo está ligado diretamente

a sua resistência mecânica, quando este é adensando por um determinado esforço. Assim, quanto mais compacto o solo, menos poroso e mais resistente ele é (Neves et al., 2010).

Para uma determinada energia de compactação, há um teor de umidade. O teor de umidade ótimo corresponde à densidade máxima que o solo pode atingir, e, para determiná-lo, utiliza-se o teste de controle. Para o adobe, o teor de umidade ótimo está entre 7% e 13%, enquanto a densidade máxima (ou compactação máxima) é de 1800 kg/m³ (ver Tabela 13) (HOUBEN & GUILLAUD, 1994).

3.11. LIMITES DE PLASTICIDADE DO SOLO

A plasticidade é a habilidade dos materiais de resistir a deformação sem quebrar, isto é, o limite de consistência do solo, que depende do teor de água, da quantidade de argila e do tipo de argila. Dependendo do teor de água, os solos passam de seco para plástico e estados de fluido à medida que mais água é adicionada. Os limites de Atterberg são os indicadores de plasticidade comumente empregados. São padrões de teste de laboratório, e na construção de terra os mais usados são o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (PL) e o índice de plasticidade, PI (PI: LL-PL) (J. DELGADO et al., 2007). Para os tijolos de adobe, o LL deve estar entre 31-55% e o LP entre o 16-33% (HOUBEN and GUILLAUD, 1994).

3.12. RETRAÇÃO DO SOLO

O limite de retração (LR) é representado pelo momento em que o solo passa do estado sólido com retração para o estado sólido sem retração, sendo este determinado pelo teor de umidade a partir do qual o volume do solo permanece constante quando se processa a evaporação da água. A evaporação da água abaixo do limite de retração mantém o volume de solo, mas a retração sucede com a abertura de trincas, gerando patologias nas paredes de terra. A retração varia de acordo com a quantidade e o tipo de argila presente no solo, pois são responsáveis pelos movimentos de retração e expansão, que ocorrem com a variação do teor de umidade (NEVES et al., 2010).

3.13. GRANULOMETRIA DO SOLO

A granulometria do solo define-se pela proporção adequada de silte, areia e argila, presentes. Cada grupo de grãos apresenta suas características próprias que irão influenciar o desempenho mecânico do solo. Se a terra selecionada tem muita argila, aumenta-se o risco de aparecerem fissuras no adobe ao secar; se tem demasiado teor de areia ou silte, pode faltar coesão interna adequada e desagregar facilmente, além de diminuir a resistência à compressão. Todos referem que o solo deve ser arenoso-argiloso, isto é, como muito areia e pouco silte (NEVES et al., 2010).

Pode-se afirmar que os blocos de terra devem ter areia grossa suficiente para permitir a obtenção de alta porosidade (e, portanto, alta resistência à geadas), e alta resistência à compressão com menor encolhimento. Mas, ao mesmo tempo, deve haver argila suficiente para criar força de ligação suficiente para que o bloco seja moldado. Por fim, deve-se averiguar os problemas de expansão e retração após molhar e secar, respectivamente (MINKE, 2012). Assim, proporções mais usuais são as seguintes (HASSANAIN et al., 2011), (ANTONELLO et al., 2006), (LERTWATTANARUK & CHOKSIRIWANNA, 2011), (PINEDA-PIÑÓN et al., 2008) e (PINEDA-PIÑÓN et al., 2007):

- areia, variando entre 55% a 87%,
- Silte 10 % a 35%
- argila 12% a 20%

A norma brasileira aponta para o doseamento seguinte (ABNT, 2020):

- 25 a 35% de argila,
- até 30% de silte e
- 45% a 65% de areia

3.14. TEOR DE SAIS DOS SOLOS

Nos materiais de construção, os sais solúveis em água e matéria orgânica não são convenientes. Houben et al (Guillaud et al., 1985) relatam que os sulfatos de Na, Mg e Ca são prejudiciais para os solos, porque cristalizam e tornam os solos frágeis. As presenças desses materiais nas paredes de terra não são recomendadas, pois tendem a se decompor ao longo do tempo e gerar pontos frágeis. Assim, recomenda-se utilizar matéria prima do subsolo, camada abaixo da camada de vegetais.

Dentro das normas existentes, não é encontrada nenhuma recomendação da quantidade mínima necessária (DELGADO & GUERRERO, 2006). Segundo a NMAC 14.7.4 (CODE, 2003), o limite máximo de sais presentes nos solos para produção de adobes BTCs ou taipa de pilão é de, no máximo, 2%. Quando se deseja avaliar o conteúdo quantitativo ou qualitativo dos sais, deve-se recorrer a procedimentos químicos de laboratório. Em resumo, um solo ideal para a construção em adobe deverá apresentar os parâmetros elencados como granulometria, limites de Atterberg, compactação, presença de sais e limite de retração, conforme a Tabela 3.

Tabela 3– resumo das propriedades do adobe.

GRANOLUMETRIA		
Areia	45% e 65%;	(ABNT, 2020)
Silte	até 30%;	(ABNT, 2020)
Argila	20% e 35%.	(ABNT, 2020)
LIMITES DE ALTEMBERG		
Limite de liquidez (LL)	31-50%	(HOUBEN & GUILLAUD, 1994)
Limite de plasticidade (LP)	16-33%	(HOUBEN & GUILLAUD, 1994)
COMPACTAÇÃO		
Teor de Umidade ótimo	7% - 13%	(HOUBEN & GUILLAUD, 1994)
Densidade máxima	1800 kg/m ³	(HOUBEN & GUILLAUD, 1994)
PRESENÇA DE SAIS		
Teor de sais	2%	(CODE, 2003)
LIMITE DE RETRAÇÃO		
		BATISTELLE, 2002
Retração (teste da caixa)	≤ 2 cm ²	ABCP, 1998

3.15. CORREÇÃO DOS SOLOS

Quando os solos se apresentam incompatíveis, a resistência mecânica não está adequada ou se deseja melhorar a resistência à água, recomenda-se o uso de aditivos, de modo a corrigir o comportamento do solo. Quando a terra apresenta excesso de argila, acrescenta-se areia na mistura ou fibras vegetais, esterco e/ou pelos de animal como forma de controlar a retração das argilas na secagem dos adobes (NEVES et al., 2010). Por outro lado, quando há excesso de areia, adiciona-se mais argila ou outros ligantes como a cal, na proporção de 5% a 15% do volume; em Portugal, tem-se a tradição de utilizar uma quantidade bem maior de ligantes. Pode-se utilizar cal dolomítica, chula ou preta, mas a cal calcária branca é a mais utilizada (FERNANDES and TAVARES, 2016). Além da correção granulométrica, temos outras formas de estabilizar a terra, que Bardou e Arzoumanian (1979) que se enquadram em quatro categorias: a estabilização por

cimentação, por armação, por impermeabilização e por tratamento químico. Os possíveis aditivos variam de acordo com a composição química da própria argila (BARDOU & ARZOUMANIAN, 1979).

ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

A estabilização por cimentação consiste na adição de substâncias capazes de solidarizar os grãos de areia e as partículas argilosas de forma a se obter um esqueleto interno que faça oposição à capacidade de absorção de água pela argila. Os aditivos mais comuns são: o cimento Portland; a cal, virgem ou hidratada; a mistura de cal e cimento; ou ainda uma mistura de cal com cinzas (MOREL et al. 2013).

A estabilização por armação se dá por meio da adição de materiais de coesão, como grãos ou fibras que, através do atrito, geram uma maior agregação das partículas de argila, concedendo uma maior firmeza ao material. O excesso de fibras tende a gerar a redução da resistência mecânica final do material, porém, se amplia a estabilidade e durabilidade do material em relação à fissuração. Dentre os materiais mais usuais se destacam as fibras vegetais (MOREL et al. 2013).

IMPERMEABILIZAÇÃO DOS SOLOS

A estabilização por impermeabilização consiste em adicionar substâncias à terra que envolvam as partículas de argila com uma camada impermeável, tornando-as estáveis e mais resistentes à ação da água. Os materiais mais usuais para atingir uma boa impermeabilidade são asfalto, óleo de coco, seivas de algumas plantas oleaginosas, o látex e os resíduos da prensagem do azeite de oliva. Por fim, a estabilização por tratamento químico se dá através da agregação de substâncias que, por meio de reação química, gerem compostos estáveis com as partículas de argila. Pacheco (PACHECO-TORGAL and JALALI, 2012) apontam que para se construir com terra é imprescindível o uso de aditivos estabilizantes no quesito proteção contra a água. Porém, Morel et al (2013) aponta que isso do ponto de vista de custo econômico e impacto ambiental é contraditório. A impermeabilização é necessária quando os solos são ricos em kaolin. Porém, não é necessário em solos com ricos em montmorillonita. Os países do norte da Europa, que sofrem com chuvas constantes para construir com terra na atualidade, necessitam de aditivos que estabilizam a terra e utilizam, tradicionalmente, no máximo, aditivos naturais como fibras vegetais (Figura 74). Por outro lado, as construções modernas utilizam-se de aditivos para tornar as construções mais seguras ou reduzir o grau de manutenção (MOREL et al., 2013). Em Portugal há situações em que se utilizou o adobe para produção de poços de água (Figura 75) e para garantir uma maior durabilidade com contato direto com a água, utilizou-se cal (VARUM et al., 2005).

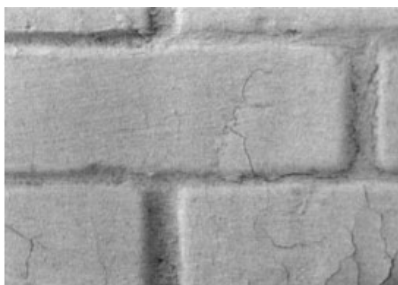


Figura 74 - Tijolos que fissuram durante a execução devido à presença de chuva. Fonte: (MINKE, 2005).

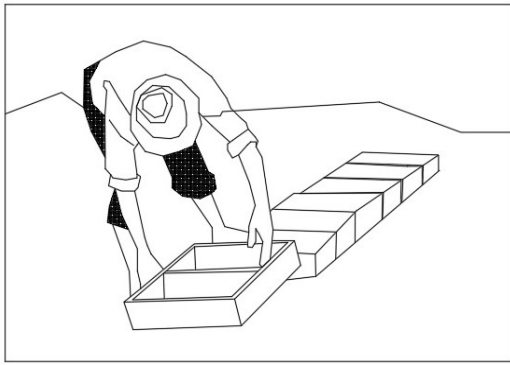


Figura 75 - Adobe em paredes de poços de água. Fonte (VARUM et al., 2005).

3.16. PROCESSO DE PRODUÇÃO

A produção dos adobes é comumente feita in loco, na própria obra, aproveitando assim o solo local, evitando gasto com deslocamento de material. O processo de produção dos adobes in loco deve obedecer às recomendações de cada fase, de modo a evitar o surgimento de deformações do bloco. As etapas, ilustradas na Figura 76 são as seguintes:

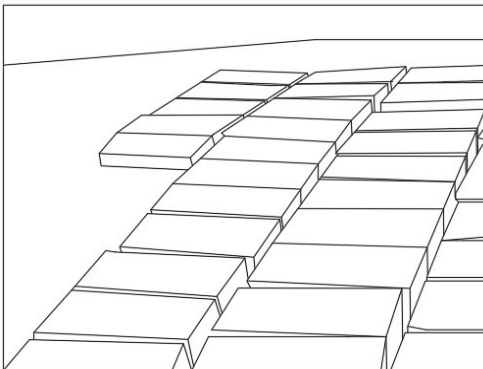
- 1) Mistura do solo com água e aditivos – i) realizar o destorroamento do solo; ii) adicionar a água amassando o barro de modo que sua distribuição fique homogeneizada e com consistência para moldagem; iii) deixar a terra em repouso por cerca de 24h, coberto com lona plástica.
- 2) Moldagem – i) preencher o molde na totalidade ii) desmoldar o adobe logo após a sua conformação, sobre uma superfície nivelada, se necessário, utilizar desmoldante.
- 3) Secagem dos adobes – i) garantir a secagem uniforme em todas as faces do adobe; ii) evitar a secagem rápida no início do processo; iii) proteger os adobes de intempéries;
- 4) Armazenamento dos adobes - empilhar os adobes até uma altura máxima de até 1,20m em local protegido de intempéries (ABNT, 2020) (Figura 76).



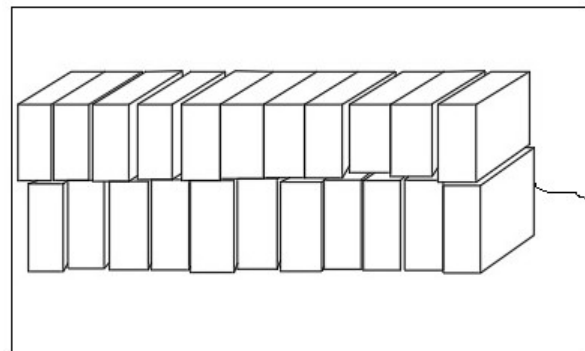
I - Mistura do solo com água e aditivos



II - Moldagem dos adobes.



III - Secagem dos adobes



IV - Armazenamento dos adobes.

Figura 76 – Etapas do processo de produção dos adobes.

Hoje em dia há vários exemplos de produção de adobe fora do local da obra. Carvalho (2012) mostra em sua tese que em algumas cidades do Ceará ainda existe produção de adobes fora do canteiro de obras, destinados à venda (CARVALHO, 2012). O arquiteto Márcio Holanda, autor projeto do estado de Santa Catarina, também proprietário da empresa Adoberia, produziu, entre os anos de 2014 e 2016, adobes fora do canteiro, permitindo assim controlar a qualidade dos blocos (HOLANDA, 2016). Independentemente do local de produção dos adobe, deve-se ter os mesmos cuidados em sua produção (ABNT, 2020) (Figura 77 e Figura 78).



Figura 77- adoberia – produção de adobes.

Fonte: (HOLANDA, 2016).



Figura 78- adoberia – transporte de adobes.

Fonte: (HOLANDA, 2016).

3.17. PROCESSO CONSTRUTIVO DO ADOBE

A execução de uma alvenaria de adobe segue os mesmos procedimentos de uma alvenaria comum de tijolo, mas com algumas peculiaridades associadas à água líquida.

- I. O seu processo construtivo se inicia pela escavação de valas para as fundações, que devem ter 40cm de largura e 50cm de profundidade e mais 30cm acima do solo, de modo evitar a umidade ascensional (ver Figura 79) (CARVALHO, 2012). Outra solução possível é o uso de uma cinta de concreto acima da fundação (HOLANDA, 2016).

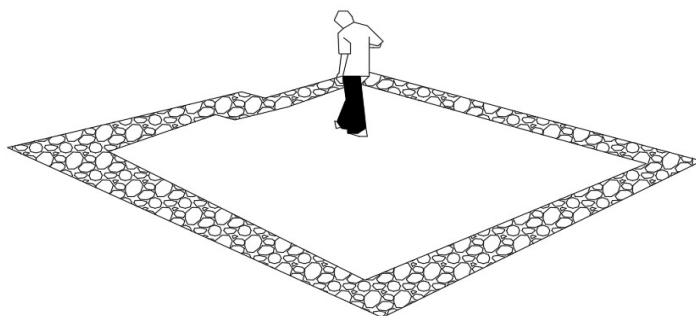


Figura 79 – Escavação das valas da fundação

- II. Com a fundação finalizada, deve-se realizar o assentamento dos blocos. Nessa etapa faz-se necessário proteger as alvenarias da chuva, de modo a evitar a erosão dos blocos ou executá-las em períodos de estiagem (MINKE, 2012). O assentamento dos blocos deve ser feito com argamassa de cal, terra ou material de propriedade semelhante. Os adobes devem ser assentados de forma contra fiada e utilizando-se instrumentos como prumo, esquadro e nível, como as demais alvenarias de tijolo (ver Figura 80) (ABNT, 2020). Durante o assentamento, deve-se umedecer os adobes, de modo a evitar que os mesmos absorvam água da argamassa, prevenindo, assim, a fissuração das paredes (CARVALHO, 2012).

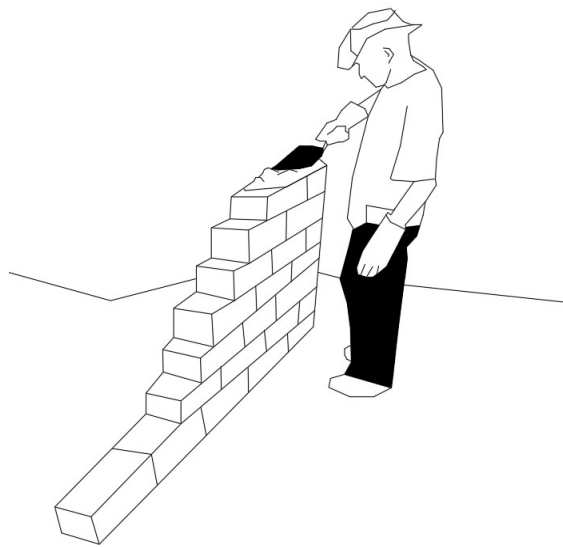


Figura 80 – Assentamento da primeira fiada de adobes.

- III. Ao elevar a alvenaria, é necessário manter os vãos livres das aberturas de janelas e portas. Sobre os mesmos, deve-se executar vergas de madeira, transpassando 30cm para cada lado ou o uso de arcos de tijolos ou adobes. Por fim, as paredes devem ser rebocadas com argamassa de cal e areia ou materiais similares com duas camadas sobrepostas. A primeira, de 2 a 3cm, com areia grossa e outra camada de acabamento com materiais mais finos com alguns milímetros de espessura. A pintura deve ser feita com tintas à base ou terra, pois não sela a superfície com as tintas acrílicas ou vinílicas (CARVALHO, 2012) (Figura 81).

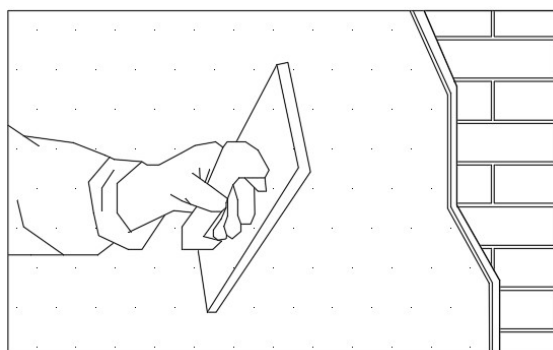


Figura 81– Execução do reboco da alvenaria de adobe.

4. DESEMPENHO CONSTRUTIVO DOS EDIFÍCIOS EM ADOBE

Os aspectos construtivos a abordar são a desempenho estrutural, durabilidade, desempenho higrotérmico. A constituição do adobe é compreendida a partir de seus parâmetros de dimensionamento dos blocos e sua composição. Para o desempenho estrutural, apresentam-se recomendações para o comportamento estrutural de paredes e blocos. Quanto a durabilidade aborda-se aspectos de proteção contra a humidade e manutenção. No estudo do desempenho higrotérmico é feita a caracterização das propriedades higrotérmicas do adobe.

4.1. DESEMPENHO ESTRUTURAL

A avaliação da resistência mecânica das paredes visa garantir uma qualidade que não comprometa sua durabilidade. Assim, a norma brasileira de adobe (NBR 16814) determina alguns parâmetros para os ensaios de laboratório (ABNT, 2020):

- O índice de esbeltez (λ) da alvenaria estrutural, razão entre a altura livre da parede (hL) e a espessura da alvenaria (t), não pode exceder 15 e é calculado por:
- $\lambda = h t L$ sendo $\lambda \leq 15$
- A distância entre enrijecedores ou largura efetiva da parede (L_{ef}) deve ser de no máximo 25 vezes a espessura da alvenaria, ou seja: $L t ef \leq \times 25$
- Considerar o valor de 18 kN/m³ como peso específico para a parede de adobe
- A resistência característica à compressão simples da alvenaria f_k é estimada como sendo 70 % da resistência característica obtida do ensaio de prismas (f_{cpk} , determinada de acordo com o procedimento estabelecido no Anexo C), calculada por:

$$f_k = \times 0,7 f_{cpk}$$

Quanto à resistência mecânica dos blocos, os documentos normativos de diversos países, como Austrália, EUA, Nova Zelândia e Brasil (DELGADO et al., 2007) sugerem valores compreendidos entre 1,3 e 2,1 Mpa. No caso específico do Brasil, a NBR 16814 aponta que o adobe deve apresentar no mínimo 1,5 Mpa (Tabela 4) (ABNT, 2020).

Tabela 4– Resistência mecânica dos blocos de adobe

NORMAS	PAÍS DE ORIGEM	FORÇA DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (N/mm^2)
Bulletin 5	Australia	≥ 2
CYTED	CYTED Internacional	$\geq 2,1$ em 80% das unidades
NMAC	EUA	$\geq 2,1$ ≥ 1.5 em uma a cada 5 unidades
NZS4298	Nova Zelândia	>1.3
OIA(1970)	USA	$\geq 1,7$
NBR (2020)	Brasil	$\geq 1,5$

Fonte: adaptado e atualizado de (DELGADO et al., 2007)

Os solos, por serem materiais naturais, não apresentam homogeneidade em sua composição. Por isso foram criadas as normas internacionais em adobe em países como Estados Unidos, França, Peru, Nova Zelândia e Austrália, que recomendam que as análises sejam feitas em laboratório, de modo a auferir as características do solo e do bloco com maior precisão (ver Tabela 5).

Tabela 5 – Quadro-resumo de regulamentação e normalização da construção com terra.

Grupo	País	Documento	Técnicas	Ano	Conteúdo
Normas oficiais e regulamentação	EUA	NMAC 14.7.4	A, BTC, T	2000	Pequenas recomendações. Unidades de construção devem ser testadas.
	França	XP P 13-901	BTC	2001	Ábacos de plasticidade e granulometria. Avaliação do solo
	Nova Zelândia	NZS 4297	A, BTC, T	1998	Recomendações não quantitativas acerca dos solos que não devem ser usados. Teste de seco/molhado necessário.
		NZS 4298		1998	
		NZS 4299		1998	
	Peru	NTE E 080	A	2000	Pequenas recomendações sobre a granulometria
	Austrália	HB 195	A, BTC, T	2002	Enumeração dos testes empíricos e laboratoriais, com procedimentos definidos para alguns ensaios. Recomendações de granulometria para cada técnica.
		Bulletin 5		1992	Recomendações gerais sobre a granulometria Observações do desempenho do património edificado.
		EBA		2001	Recomendações não quantitativas acerca dos solos a não usar
Documentos técnicos	CYTED	CYTED	D A, BTC, T	1995	Não define uma aproximação direta à seleção dos solos, recomendações dependem da resistência a seco dos ensaios
	Houben and Guillaud		A, BTC, T	1994	Propriedades essenciais: granulometria, plasticidade, compactação e coesão. Testes de identificação preliminares e laboratoriais são explicados. Ábacos de granulometria, plasticidade compactação

Mc. Henry PG	A, T	1984	Escolha de solos que têm boa performance em construções existentes
Smith and Austin	A, BTC, T	1996	A escolha do solo é determinada pelos testes de resistência à compressão
OIA	A, BTC, T	1970	Adequabilidade acerca de usar os testes sensoriais para tomar decisões
Spence and Cook	A, BTC, T	1983	Conhecer essencialmente as propriedades: tamanho das partículas, limites de Atterberg, compactação e classificação de solos, apesar de não darem as recomendações.

Fonte: adaptado e atualizado a partir de Delgado e tal (2007).

A grande heterogeneidade de dimensões e de constituição do adobe dificulta a caracterização e o estudo da construção em adobe. Dessa maneira, podem-se encontrar paredes resistentes realizadas em adobe extremamente fraco, como por exemplo em terra preta (rica em matéria orgânica), ou em adobe melhorado com inclusão de palha para melhorar as suas propriedades mecânicas. Em alguns casos, encontram-se na mesma parede diferentes tipos de adobe misturados de uma forma mais ou menos aleatória com outros materiais, como por exemplo a pedra (VARUM, 2008).

4.2. DURABILIDADE

A durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe foram atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional (ABNT 2013). O adobe como material tende a sofrer uma rápida degradação quando exposto a intempéries, como erosão devido à chuva. Desse modo, a arquitetura vernácula, por meio dos seus construtores tradicionais, precisou de soluções astutas e necessárias para uma durabilidade máxima das construções, por meio de recursos locais disponíveis. Porém, muitas destas soluções foram esquecidas, pelo desuso, falta de valorização e falta de registo (CALABRIA et al., 2009). As principais intempéries naturais podem ter origem em agentes térmicos, mecânicos, químicos e biológicos (LERTWATTANARUK & CHOKSIRIWANNA, 2011). Além das intempéries naturais, é prejudicial o uso de materiais incompatíveis com o adobe, seja na fase de projeto ou de manutenção, assim como falhas na execução.

4.2.1. PROTEÇÃO CONTRA UMIDADE

O principal agente mecânico que pode afetar as construções em adobe são: a umidade, seja na forma de vapor ou líquida, as geadas e a força da chuva, através do vento. Essas ações são cada vez mais fortes quanto mais elevada for a porosidade do material (HOUBEN & GUILAUD, 1989). Em casos de geadas, os tijolos de adobe se apresentam mais resistentes do que os tijolos cerâmicos, por serem mais porosos. Porém, não são muito resistentes às águas da chuva porque são pouco argilosos (MINKE, 2005). A chuva tende a reduzir a coesão da terra, pois lavam as argilas, contribuindo para a decomposição do material. A presença de água sobre as alvenarias de adobe diminui consideravelmente a resistência do material, além de favorecer o desenvolvimento de eflorescências salinas – NaCl (cloretos), CaSO₄, NaSO₄ (nitratos) - que atacam o material, gerando cavidades que podem abrigar insetos e roedores (HOUBEN & GUILAUD, 1989).

A penetração de água na alvenaria através do contato direto com água líquida pode ocorrer por motivo de: escoamento de águas do telhado, lavagem do piso no interior do edifício, escoamento na base da parede (algeroz próximo), mau dimensionamento, não impermeabilização das fundações, infiltração de água por meio de fissuras estruturais, passagem dos barroteiros dos pisos ou coberturas sobre as alvenarias; infiltrações induzidas pelos componentes que fazem interface entre a cobertura e alvenaria e entupimento de gárgulas. A água líquida tende a afetar os edifícios quando existem aberturas sobre a superfície que permitam a sua penetração, como fendas, janelas ou fissuras, e a ação de uma força (pressão, gravidade e capilaridade) que faça a água penetrar na abertura. A forma de penetração mais típica resume-se à penetração por água líquida ou vapor (HOUBEN & GUILAUD, 1989)

Compreendendo esta fragilidade do material perante a água líquida, diversos autores apontam soluções para paredes externas e paredes internas, nas zonas molhadas, como banheiros e cozinhas. No contexto das paredes externas, recomenda-se sistemas de proteção na base e no topo das paredes. Assim, com o objetivo de proteger, deve-se realizar manutenção frequente nos peitoris das janelas, juntas dos terraços, gárgulas e revestimentos.

De modo a evitar a umidade ascensional do solo, recomenda-se a proteção na base das alvenarias; Varum (2005) sugere que a mesma seja assentada sobre um primeiro alicerce em pedra (VARUM et al., 2005). Arquitetos contemporâneos como Márcio Holanda, adotam em suas obras, além do alicerce de pedra, uma cinta de concreto armado feita de bloco canaleta, protegendo a parede também da umidade gerada pela lavagem do piso dos ambientes internos (HOLANDA, 2016) (Figura 82 e Figura 83).

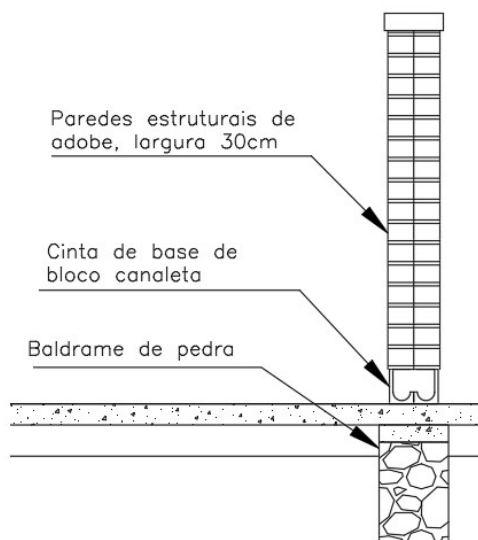


Figura 82 – Proteção para base das paredes. Fonte: (HOLANDA, 2016).



Figura 83 – Proteção para base das paredes. Fonte: (HOLANDA, 2016).

As superfícies das paredes não devem ser impermeabilizadas, pois necessitam antes de tudo “respirar” e serem permeáveis às migrações de vapor de água, evitando o risco de condensações (HOUBEN and GUILAUD, 1989). Assim, as argamassas de revestimentos devem apresentar baixos valores de absorção de água capilar, elevada capacidade de secagem, elevada permeabilidade ao vapor e baixa permeabilidade à água líquida (MOROPOULOU et al., 2003) e (HERNÁNDEZ et al., 2000). As paredes devem ser rebocadas com argamassas à base de cal, pois além de permitirem as trocas de vapor, têm baixa condutividade térmica e funcionam com filtro químico (VEADO, 2008). Nas paredes internas, principalmente nas áreas molhadas, como cozinha e banheiros, recomenda-se o uso de revestimentos à base de caseína, cal, óleo de linhaça ou outros que reduzam a abrasividade sobre a superfície das paredes. Banheiros com paredes de terra são mais higiénicos do que aqueles com azulejos, pois a terra absorve rapidamente umidade elevada, inibindo, desse modo, o crescimento de fungos (MINKE, 2012).

As paredes também não devem ser impermeabilizadas, para evitar a condensação do vapor de água, gerando fungos e bolor. Ambientes com baixa ventilação em climas úmidos podem também gerar a condensação das paredes, assim recomenda-se o uso de ventilação constante de porões e forros (HOUBEN & GUILAUD, 1989).

Em casas de adobe em Portugal, utiliza-se de técnicas para reduzir o teor de umidade nas paredes internas como o uso de desvão de ventilação ou desvão sanitário, comumente utilizado para permitir a secagem das paredes na sua base, contribuindo para diminuir a ocorrência dos efeitos

das humidades ascensionais e aumentar a durabilidade das paredes e vigas de madeira nas rés do chão, mantendo as casas secas. Em Portugal, o desvão é formado por janelas em todas as fachadas, sendo de dimensões variando de 0,10mx0,20m até 0,20x0,30m, podendo ser maiores em edifícios antigos. Assim, os desvãos eram formados pelos muros de fundações, que possuíam simplesmente aberturas ou janelas permitindo a circulação do ar toda a base do edifício. Do mesmo modo, utiliza-se de forma criteriosa zonas de luz na cobertura, permitindo o controle de temperaturas e umidade (FERNADES and TAVARES, 2016) (Figura 84).

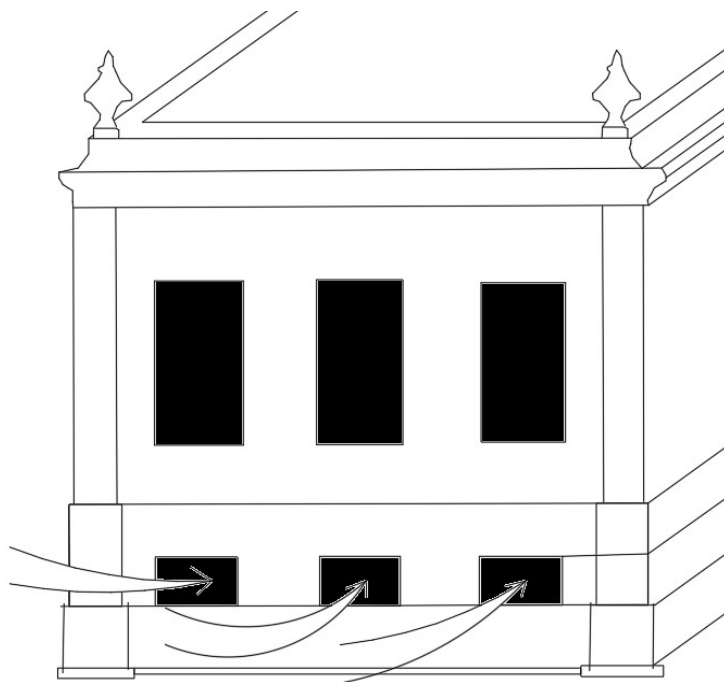


Figura 84 – Desvão de ventilação.

4.2.2. MANUTENÇÃO

Além do uso de materiais compatíveis, faz-se necessário sua constante manutenção (VARUM et al., 2005). A não manutenção ou reparação do reboco pode gerar o destacamento da mesma perda de material de partes dos blocos de adobe (HOUBEN & GUILAUD, 1989). O topo das paredes deve estar protegido utilizando-se beirais razoáveis de no mínimo 0,80cm ou de caleiras, em caso de beirais pequenos (FERNADES & TAVARES, 2016).

4.3. DESEMPENHO HIGROTÉRMICO

O comportamento higrotérmico do adobe pode ser explicado através das propriedades físicas, sejam as gerais: densidade e porosidade aparente; térmicas como: calor específico e condutibilidade térmica, ambos dependentes da umidade (LIUZZI et al., 2013), difusividade, efusividade, emissividade (REMPEL & REMPEL, 2013) quanto propriedades hígricas, como fator de resistência à difusão da água, função do armazenamento de umidade e coeficiente de absorção de água (LIUZZI et al., 2013).

Do ponto de vista higrotérmico, as construções em adobe não são bons isolantes térmicos, mas são bons moderadores de temperatura, isto é, têm boa inércia pois permitem a passagem do calor lentamente, gerando um equilíbrio entre a temperatura interior e a exterior. Outra característica das construções em terra é que sua capacidade de transmitir calor depende do grau de saturação de umidade: quanto maior o grau de saturação dentro da parede, mais rápido o calor é transmitido (REES et al., 2001). Por outro lado, a terra também possui uma boa capacidade de equilibrar a umidade dos ambientes internos, que quando em excesso, pode trazer problemas de saúde dos habitantes (MINKE, 2012). Porém, em alguns casos se faz uso de estabilizantes na composição do adobe com cimento ou cal, pois podem reduzir a capacidade de transferência de umidade (MOREL et al., 2013)

Dentre os diversos autores analisados, verificou-se que a densidade aparente de um adobe pode ter a variação de 1000 a 2000 Kg/m³, apresentando uma média de 1580,65 Kg/m³; essa variação pode ocorrer devido à granulometria do material ou à presença de aditivos, como fibras, cal ou cimento (PALUMBO 2015) e (LERTWATTANARUK and TUNGSIRISAKUL 2007). Segundo Minke (2005), quanto maior a quantidade de areia na granulometria do solo, maior é sua porosidade (MINKE, 2005). No caso da porosidade, encontraram-se valores que variam de 14 a 45%, apresentando um valor médio de 37,9% (ANTONELLO et al., 2006), (ELERT et al., 2015) e (LERTWATTANARUK & TUNGSIRISAKUL, 2007) como se vê na (Tabela 6).

Tabela 6 – Variação dos valores das propriedades gerais

Propriedades gerais	Valores					
	Variação			Média		
Densidade *	1000-2000 Kg/m^3			1580,65 Kg/m^3		
Porosidade **	14-45%			37,9%		
Granulometria ***	Areia	Silte	Argila	Areia	Silte	Argila
	55-87%	10 -35%	20-12%	59,5%	21,66%	20,55%

*(M. C. J. DELGADO & GUERRERO, 2006); (MINKE, 2012), (MAZRIA, 1979), (PERRIGAULT et al., 2012), (ANTONELLO et al., 2011), (Kevan HEATHCOTE, 2011); (MATOS & DOS SANTOS, 2006) e (ANTONELLO et al., 2006).

** (ANTONELLO et al., 2006), (ELERT et al., 2015) e (LERTWATTANARUK & TUNGSIRISAKUL, 2007).

*** (HASSANAIN et al., 2011), (ANTONELLO et al., 2006), (LERTWATTANARUK & TUNGSIRISAKUL, 2007) e (PINEDA-PIÑÓN et al., 2007).

O adobe apresenta alto calor específico, variando de 789 a 1004,83 kg.K, sendo o valor médio de 900,30 kg K. Ao compararmos os valores de calor específico com a densidade, constatou-se que quanto mais denso, maior é o calor específico do adobe. Encontrou-se também moderada condutividade térmica (λ) variando entre 0,5 e 1,54 W/ (m.K), sendo o valor médio 0,84 W/ (m.K). A **condutividade térmica** varia de acordo com o teor de umidade do material, a densidade dos grãos que compõem os solos, os aditivos e a porosidade. Quanto mais denso o material, maior sua condutividade térmica (Kevan HEATHCOTE, 2011). Assim, como quanto mais poroso o material, menor é sua condutibilidade térmica; quanto maior percentagem de fibras, menor é sua condutibilidade térmica (LERTWATTANARUK & CHOKSIRIWANNA, 2011) e quanto maior a quantidade de areia maior sua porosidade, menor é a condutividade térmica. As condutividades térmicas das argamassas de terra apresentam as mesmas dimensões e equipamentos semelhantes. As argamassas de terra apresentam valores semelhantes a argamassas de cal e areia (GOMES et al 2017).

O alto calor específico, aliado à moderada condutividade térmica, permite que as paredes de adobe ganhem calor e o liberem lentamente, gerando uma boa inércia térmica (REMPEL and REMPEL 2013). Isso reduz a necessidade de sistemas de aquecimento ou refrigeração, gerando economia

de 69% de energia de aquecimento no inverno e 57% de economia de energia de refrigeração no verão (GOMES et al 2017).

A difusividade térmica apresentou a seguinte variação: 0,617-0,3599 mm^2/s , sendo a média 0,488. A emissividade apresentou uma pequena variação 0,8 a 0,92, sendo o valor médio 0,87. Segundo (GUERRERO et al., 2005) a cor dos tijolos de adobe pode provocar pequenas alterações na sua emissividade, em que quanto mais claro, maior o nível emissividade (Tabela 7)

Tabela 7 - Variação dos valores das propriedades térmicas

Propriedades Térmicas	Valores		
	Variação	Média	Unid.
Calor específico (c) **	789-1004,83	900,30	J/kg K
Condutividade Térmica (λ) *	0,45-1,54	0,804	W/(m K)
Difusividade ***	0,617-0,3599	0,488	mm^2/s
Emissividade (ϵ) ***	0,80 – 0,92	0,87	

* (MINKE, 2012), (MAZRIA, 1979), (PERRIGAULT et al., 2012) e (HASSANAIN et al., 2011)

** (GOMES, 2015), (MINKE, 2012), (MAZRIA, 1979), (ACHENZA et al., 2008), (Kevan HEATHCOTE, 2011), (PERRIGAULT et al., 2012), (MATOS & DOS SANTOS, 2006) e (LERTWATTANARUK & CHOKSIRIWANNA, 2011).

*** (PERRIGAULT et al., 2012) e (GUERRERO et al., 2005).

**** (DESOGUS et al., 2014) e (HASSANAIN et al., 2011)

Ao realizar um cruzamento de dados de autores com (HASSANAIN et al., 2011), (Kevan HEATHCOTE, 2011), (ANTONELLO et al., 2006) e (MATOS & DOS SANTOS, 2006) da densidade do adobe com sua condutibilidade térmica, verificou-se que quanto maior a densidade da terra, maior sua condutibilidade térmica. Ao mesmo tempo, comparou-se os resultados realizados por (MINKE, 2012) com diversos tipos de terra, que seguiu um comportamento similar (Figura 85).

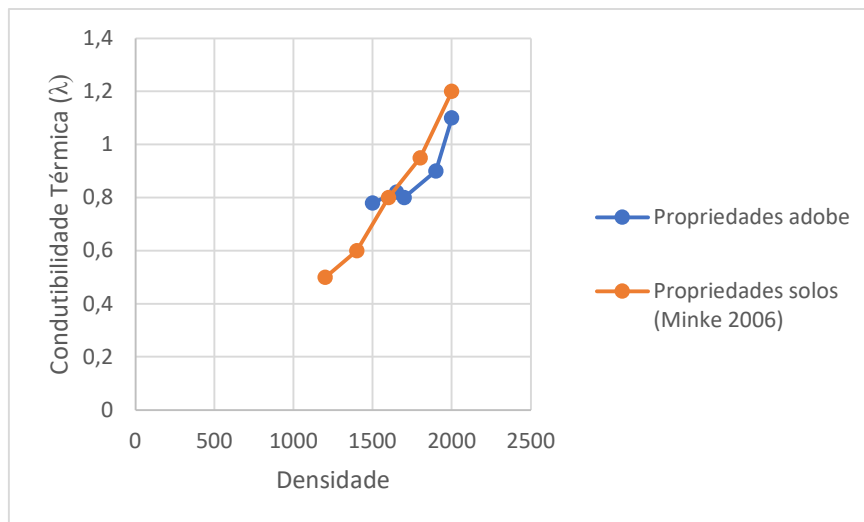


Figura 85 - Variação da condutibilidade térmica em função da densidade.

As propriedades térmicas descritas acima resultam em alvenarias com moderada transmitância e alta capacidade térmica, que permitem uma elevada inércia térmica. Quanto mais espessas as paredes, maior a inércia. A inércia térmica permite controlar as variações de temperaturas internas do edifício em adobe, o que gera um bom atraso térmico (PARRA-SALDIVAR & BATTY, 2006).

Após a análise de vários modelos computacionais de edifícios em terra, verificou-se que a resistência térmica da parede em estado estacionário é baixa, mesmo para paredes grossas. Porém, para as paredes com mais de 45 cm de espessura, pode-se tirar benefício total da massa térmica, quando a resistência térmica cíclica é alta e aumenta exponencialmente. Isso resulta em temperaturas médias acima do normal no verão e abaixo do normal no inverno. Este nivelamento das variações de temperatura pode levar a uma tolerância para temperaturas médias ligeiramente mais altas, reduzindo assim o efeito da baixa resistência térmica no estado estacionário. Nos climas frios do norte da Europa, onde há períodos com neve, se faz necessário o uso de isolantes térmicos nas paredes de terra, pois a espessura de 45cm não é suficiente. Outra possibilidade é colocar uma camada de poliestireno no centro da parede; assim, uma parede com 250mm de espessura com uma camada de 50mm de poliestireno no centro apresenta uma resistência térmica estacionária equivalente a uma parede de tijolos maciços com uma resistência 1,5 de isolamento na cavidade. Nos climas quentes ou temperados com verões quentes, as paredes com cores claras contribuem para uma redução significativa da temperatura do ar melhorando a baixa resistência térmica estacionária das paredes (REMPEL and REMPEL, 2013). No mais, se faz necessário analisar suas propriedades hídricas, pois a alvenaria de adobe, por ser muito porosa, altera os

comportamentos de suas propriedades térmicas, que variam de acordo com o seu teor de umidade (MINKE, 2005).

Mesmo que a variação de **umidade** entre 30% e 80% não afeta a saúde humana, deve-se considerar que a umidade relativa entre 30% e 60% é preferível entre os 18° a 20°. Assim como a entalpia (energia latente) associada com alta umidade relativa no ar não pode ser ignorada. Em um ambiente quente-úmido, a umidade pode causar sudorese, isto é transpiração excessiva, enquanto um ambiente de baixa umidade pode causar ressecamento dos olhos e da pele (CRUMP, 2002). Por esses e por outros motivos o comportamento da umidade não pode ser negligenciada, pois quando o teor de umidade é muito alto pode gerar desconfortos, como redução de produtividade. Alguns estudos apontam que a umidade relativa do ar deve estar entre 40 a 70% para garantir o conforto humano em espaços de escritórios localizado em climas quentes e úmidos (TSUTSUMI et al., 2007). Em materiais porosos, sua massa varia em função da umidade do meio em que se insere, isto porque quando há diferença de umidade entre o ambiente interno e externo, o material tende a absorver ou liberar água até encontrar um ponto de equilíbrio. Este intervalo corresponde ao domínio higroscópico (LANZINHA, 1998).

O adobe é um material que, além de equilibrar as temperaturas internas e externas, tem a capacidade de equilibrar o teor de umidade pelo fato de ser poroso e composto por argila, que é um material higroscópico (MARTINS et al., 2010). De modo a compreender o comportamento higrício do adobe, foram levantadas na literatura as seguintes propriedades: a curva higroscópica, fator de resistência à difusão da água, o coeficiente de absorção de água e a capacidade total de absorção de água e o coeficiente de penetração capilar.

Quando a argila tem contacto direto com a água líquida se expande e enfraquece, porém, quando há o contacto com a umidade em forma de vapor, a parede a absorve e permanece sólida, mantendo a sua rigidez sem expandir. Assim, a parede de barro pode equilibrar a umidade do ar interior. Em zonas de clima moderado e frias, o vapor de água contido no ar do interior se difunde através das paredes para o exterior. Se o ar é arrefecido para baixo nas paredes e atinge o seu ponto de orvalho, ocorre condensação. Quando ocorrem condensações de umidade nas paredes de terra, aumenta-se sua condutibilidade térmica, o que pode conduzir ao crescimento de fungos. Em tais casos, é importante que essa umidade seja transportada rapidamente por ação capilar à superfície das paredes, onde pode evaporar. Assim, materiais como o barro, com uma elevada capilaridade, são vantajosos. A fim de reduzir o perigo de condensação nas paredes, a resistência à transmissão de vapor deve ser mais elevada no interior do que no exterior. Por outro lado, a resistência à transferência de calor deve ser maior fora do que dentro. Nesses casos, recomenda-

se criar uma barreira de vapor do lado de dentro, através da utilização dos materiais de acabamento como cerâmico ou rebocos adequados (MINKE, 2012).

Dentro da vasta literatura sobre o adobe, encontrou-se muito pouco dados sobre suas **propriedades hígricas**. Os trabalhos encontrados foram duas pesquisas, de Martins, Varum, and Costa (2010) e Martins et al (2010), que realizaram ensaios para mensurar o coeficiente de absorção capilar, o coeficiente de penetração, o teor de umidade de saturação capilar e a sua capacidade total de absorção do tijolo de adobe:

- O coeficiente de absorção capilar (A_w) apresentou valores que variam entre 0,72 - 2,07 $kg/m^2 \cdot s^{0,5}$ e um valor médio de 1,2 $kg/m^2 \cdot s^{0,5}$.
- O coeficiente de penetração capilar teve valores que variam de 0,141 - 0,153 ($cm/s^{0,5}$) e um valor médio de 0,158 $cm/s^{0,5}$.
- Quanto aos valores da capacidade total de absorção de água do adobe, obteve-se um valor médio de cerca de 15% do seu peso “seco” durante 7 dias. Segundo Martins, Varum, and Costa (2010), esse adobe se enquadra como não estabilizado, por esses valores superarem o limite admissível de estabilização preconizado para ele de 2,5%.
- O teor de umidade de saturação capilar (W_{cap}), apresentou 15,29 - 18,74 kg/m^2 , com uma média de 17,015 kg/m^2 .

Ao se analisar esses resultados, comprova-se a elevada porosidade e permeabilidade do adobe, configurando-o como um material formado por um sistema poroso de elevada conectividade entre poros, o que permite um fluxo fácil da água capilar e capacidade de armazenamento por meio da argila, presente na sua composição (Tabela 26) (MARTINS et al., 2010) (Tabela 8).

Tabela 8 - Variação dos valores das propriedades hígricas

Propriedades hígricas	Valores		
	Média	Variações	Unid.
Coeficiente de absorção capilar (A_w)	1,2	0,72 - 2,07	($kg/m^2 \cdot s^{0,5}$)
Teor de umidade de saturação capilar (W_{cap}) ou valor assintótico	17,015	15,29 - 18,74	(kg/m^2)
Coeficiente de penetração capilar	0,158	0,141 - 0,153	($cm/s^{0,5}$)
Capacidade total de absorção	14,87	13,5 – 16,2%	%

Fonte: (GOMES, 2015) e (MARTINS et al., 2010)

Dentro da literatura, encontraram-se pesquisas com recomendações de arquitetura bioclimática em adobe feitas através de simulações com modelos térmicos ou monitoramento em campo. As pesquisas estão distribuídas em alguns países das Américas, Europa e Oriente Médio, o que permite constatar o comportamento do adobe em climas tropicais úmidos, secos e temperados. Por serem escassos os estudos do comportamento do adobe em climas tropicais irá se aprofundar nos estudos existentes.

Na América do Sul, Francisco (2011) desenvolveu um estudo comparativo entre as alvenarias de adobe e de tijolo cerâmico através de uma simulação numérica na cidade de Serra Azul, Brasil, região com o clima de mesotérmico de inverno seco (Cwa) (Maíra do Lago FRANCISCO 2011). Na América Central, Parra-Saldivar and Batty (2006) fez simulações computacionais, variando espessuras de paredes e dimensões de aberturas. As simulações foram realizadas para 3 cidades mexicanas: Chiapas, com o clima semiárido frio (BSk); Baixa Califórnia, clima savânico (Aw) e Tamaulipas, clima semiárido quente (Bsh) (PARRA-SALDIVAR and BATTY 2006). Na América do Norte, a pesquisa de Rempel and Rempel (2013) avaliou o comportamento térmico de paredes de adobe no Colorado, EUA, região de clima semiárido frio (BSk). No Oriente Médio, na pesquisa de Hamdan (2002), realizaram-se simulações não computacionais utilizando várias camadas de isolamento para alvenaria de adobe desenvolvida para cidade Amã, Jordânia, com um tipo de clima Mediterrâneo (Csa) Na Europa, e Desogus et al (2014) fizeram o monitoramento de uma edificação em adobe em Sardenha na Itália, com clima Mediterrâneo (Csa). Na pesquisa de Bruno and Faria (2010) na região do Alentejo, Portugal com o clima Mediterrâneo (Csa), foram reunidas recomendações bioclimáticas para as habitações tradicionais da região para atenuar os efeitos do clima (Tabela 99).

Tabela 9 – Resumo dos trabalhos científicos sobre comportamento higrotérmico do adobe

Tipo	Local	Clima	Autores
Simulação não computacional comparativa de um modelo de alvenaria de adobe e outra com cerâmica	Serra Azul, Brasil	Mesotérmico de inverno seco (Cwa)	(Maíra do Lago FRANCISCO, 2011)
Simulação não computacional de várias camadas de isolamento para alvenaria de adobe	Amã, Jordânia	Mediterrâneo (Csa)	(HAMDAN, 2002)
Simulação de casas em adobe	Baixa Califórnia, México	Semiárido frio (BSk),	(PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006)
	Chiapas, México	Savânico (Aw)	
	Taumalipas, México	Semiárido quente (Bsh)	
Simulação: variação de espessuras de paredes de adobe	Colorado, EUA	Colorado – Semiárido frio (BSk)	(REMPEL and REMPEL, 2013)
Monitoramento de uma casa de adobe	Sardenha, Itália	Mediterrâneo (Csa)	(DESOGUS et al., 2014)
Apresenta soluções de melhorias para o desempenho térmico de paredes de terra	Alentejo, Portugal	Mediterrâneo (Csa)	(BRUNO and FARIA, 2010)
Cataloga soluções de arquitetura passiva de origem árabe nas construções coloniais brasileiras	Brasil	Genérico	(SOUZA, 2016)

Fonte: autor

A pesquisa de Hadman (2002) consiste nos estudos de simulação numérica não computacional para avaliar a atenuação de uma onda de calor através de cinco paredes diferentes na Jordânia. Cada parede feita de materiais locais com quatro camadas heterogêneas de pedra, bloco de concreto, argamassa cimentícia, adobe e isolante térmico, geraram cinco combinações diferentes (ver Tabela 18). A pesquisa constatou que há uma alta correlação entre a atenuação da onda de calor, a temperatura da superfície interna e a umidade relativa, pois à medida que o fator de

atenuação aumenta, o mesmo ocorre com a diferença de temperatura e umidade entre o interior e o exterior. Porém, a umidade tende a se estabilizar, quando a resistência térmica chega a $1,05\text{m}^2\text{C}/\text{W}$, assim, como atraso térmico tem um crescimento rápido até $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Com a localização da camada de isolamento, verificou-se que quando esta está no lado interno da parede, tem melhor efeito sobre estes parâmetros e, conseqüentemente, a diminuição da quantidade de condensado de vapor de água (HAMDAN, 2002) (Tabela 10).

Tabela 10 – Estudos de camadas de isolamento para paredes

Número da parede	Camada 01	Camada 02	Camada 03	Camada 04
01	Pedra	Concreto	Isolamento	Reboco de concreto
02	Reboco de concreto	Concreto	Isolamento	Reboco de concreto
03	Reboco de concreto	Adobe	Isolamento	Reboco de concreto
04	Pedra	Isolamento	Adobe	Reboco de concreto
05	Reboco de concreto	Adobe	Isolamento	Reboco de concreto

Fonte: (HAMDAN, 2002)

A pesquisa de Rempel e Rempel (2013) foca-se no estudo de materiais de alta capacidade térmica e condutividade térmica moderada, dentre eles a alvenaria de adobe. Observa-se a correspondência entre parâmetros térmicos de armazenamento e liberação de calor em configurações solares passivas de ganho direto, indireto e isolado por meio de simulações das diversas paredes. As simulações avaliaram paredes externas de adobe de 30, 45 e 60 cm de espessura em um típico dia ensolarado de janeiro no Colorado, cujo clima é do tipo semiárido frio (BSk). Nessa pesquisa observou-se que os fluxos de calor variam drasticamente com a espessura da parede. Nas paredes mais delgadas o pico de fornecimento de calor ocorre às 22:00h; para a parede intermédia, às 3:00h da manhã, e para a parede mais espessa, não é fornecido calor líquido ao interior nas condições apresentadas. Assim, a magnitude do fornecimento de calor para o espaço ocupado também varia muito com $10\text{ W}/\text{m}$ para a parede mais fina, $2\text{ W}/\text{m}$ para a parede média e $-5\text{ W}/\text{m}$ para a mais espessa. Ao mesmo tempo, a

parede mais espessa perde menos calor total do interior durante o período de 24 horas. Por fim, a investigação concluiu que as paredes delgadas permitem o aquecimento noturno. Já para o aquecimento diurno nenhuma das três soluções é viável. No caso do resfriamento diurno, recomenda-se investigar as opções mais espessas através de experimentos ou simulações com dados meteorológicos de verão (REMPEL and REMPEL, 2013).

No Brasil, o estudo de Francisco (2011) avalia o desempenho térmico de duas residências rurais no Assentamento rural Sepé Tiaraju, Serra Azul, Estado de São Paulo, enquadrado na zona bioclimática 4, pela comparação do comportamento térmico para um dia típico de verão. Os modelos analisados apresentam as mesmas dimensões e geometrias e se diferenciam pelos tipos de alvenaria. A cobertura é composta por telha cerâmica com estrutura em madeira, forro de madeira pinus sem ventilação, com câmara de ar de 10cm. As janelas são feitas de madeira de pinus, piso em cimento queimado. A alvenaria do modelo 1 é composta por adobes de 14cm, revestidos com argamassa de terra com transmitância (U) igual $2,92 \text{ W/m}^2\text{K}$ e um moderado fator de inércia igual 0,8. O modelo 2, alvenaria de tijolo cerâmico sem revestimento com transmitância de $U = 2,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ e um baixo fator de inércia igual a 0,6. A pesquisa investigou o comportamento de um único ambiente, no caso, a sala/cozinha (Figura 86) (Maíra do Lago FRANCISCO, 2011).

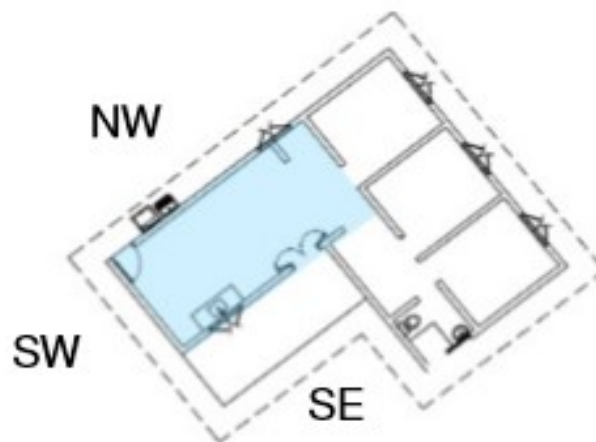


Figura 86 - Planta da unidade habitacional assentamento rural Sepé Tiaraju, Serra Azul, Brasil.

Fonte: (FRANCISCO, 2011)

O período de avaliação foi somente durante um dia inteiro no período mais quente da região. Analisou-se um único cômodo, a cozinha. Não foram realizados monitoramentos de campo, os dados do clima local e dados dos materiais foram retirados de arquivos climáticos disponíveis no site do Laboratório de Eficiência Energética (LABEE). Ao fim do experimento verificou-se

105

que a casa de adobe apresentou o melhor desempenho, com uma temperatura máxima de 27,2°C, enquanto a casa de alvenaria cerâmica atingiu uma temperatura máxima de 30,7°C. Foi possível constatar que, apesar da transmitância térmica similar, a inércia térmica superior da alvenaria de adobe permitiu um maior atraso térmico e uma redução de calor em seu horário de pico (FRANCISCO, 2011) (Tabela 11).

Tabela 11 - Resumo dos comportamentos das casas de adobe e tijolo cerâmico.

DADOS	Adobe	Tijolo Cerâmico
$U_{Cobertura para fluxo descendente}$	1,79 W/m ² K	1,79 W/m ² K
$U_{Cobertura para fluxo ascendente}$	3,84 W/m ² K	3,84 W/m ² K
U_{parede}	2,92 W/m ² K	2,10 W/m ² K
Fator de Inércia	0,8 (média)	0,6 (fraca)
Q_{sol} (W)	3803	3140
Q_{total} (W)	3803	3732
$Q'_{total} (\Delta t)$ (W)	392,78 Δt	383.75 Δt
N	5	6
$T_{imáx}$	27,2°C	30,7°C
TE (0,5m/s)	24,7°C	27,9°C
TE (1,0m/s)	24,0°C	27,2°C
TE (1,5m/s)	23,5°C	26,6°C

Fonte: (FRANCISCO, 2011)

Quando as edificações foram avaliadas dentro do Nomograma de temperatura efetiva para pessoas normalmente vestidas em roupas de trabalho leve, verificou-se que somente a casa de adobe (linha verde), atingiu um resultado satisfatório, pois se enquadra na zona de conforto (Figura 87) (FRANCISCO, 2011).

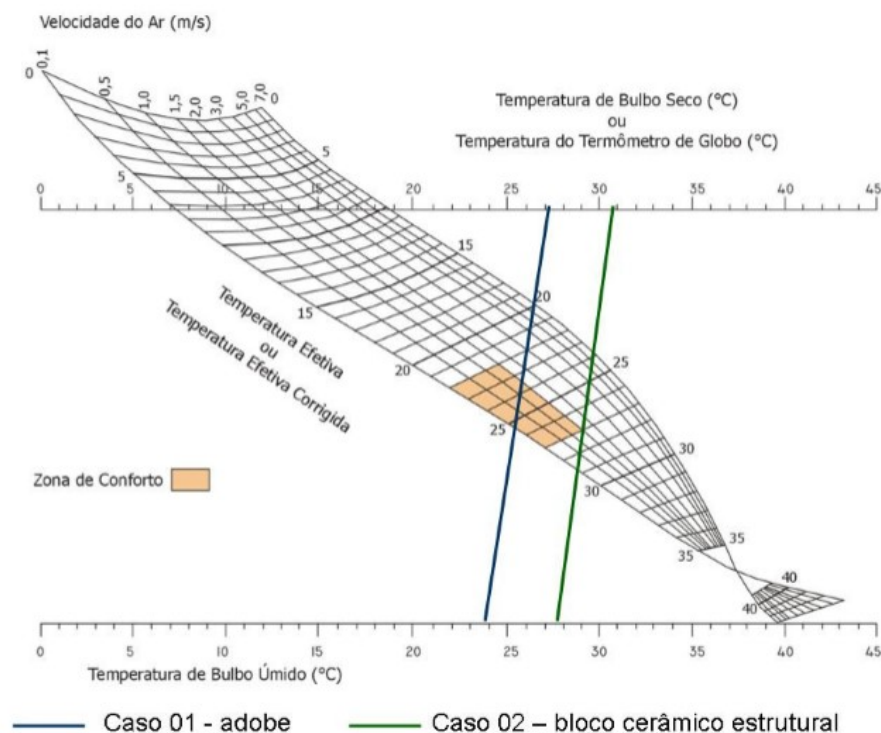


Figura 87 - Nomograma de temperatura efetiva para pessoas normalmente vestidas em trabalho leve, resultados casos 01 e 02. Fonte: (FRANCISCO, 2011)

A pesquisa de Francisco (2011) faz uma contribuição importantíssima através de um processo comparativo entre dois tipos de alvenaria: tijolo cerâmico e adobe. Porém, não avalia com profundidade o comportamento dinâmico da alvenaria de adobe, pois a simulação foi feita para um único dia e não para um ano inteiro. Com uma simulação mais abrangente a nível anual seria possível compreender se ao longo do ano se haveria uma diferença relevante entre ambas, e se haveria alguma diferença entre os meses frios e quentes. O experimento avaliou somente a envoltória, não considerou a ventilação do edifício. Outra falha do modelo foi a comparação de duas alvenarias em condições não convencionais, no caso a alvenaria de adobe com revestimento externo em terra, onde o convencional se utiliza cal. Diversos autores recomendam o uso de reboco à base de cal, de modo a proteger a mesma das intempéries e o uso de alvenaria de tijolo cerâmico sem revestimento, quando o usual seria revesti-la com argamassa cimentícia, o que resultou em comparações de desempenho térmico não condizentes com os sistemas construtivos reais (FRANCISCO, 2011).

No trabalho de Parra-Saldivar et Batty (2006), foram simuladas casas de adobe em três climas distintos, mais especificamente nas cidades mexicanas de Baixa Califórnia, com o clima semiárido frio (BSk), Chiapas, com o clima savânico (Aw) e Taumalipas (Bsh), com o clima

semiárido quente, durante dias representativos de cada estação: janeiro, abril, julho e outubro. Em todos os experimentos, mantiveram-se constantes os seguintes parâmetros: orientação da frente da casa voltada para o sul e parede externa com 34cm, independentemente do tipo de elemento isolante no centro da parede. A partir desses parâmetros determinaram-se as variáveis que seriam analisadas de forma independente: tamanho das janelas, orientação das janelas, condutividade térmica da parede externa e clima da região (Tabela 12 e Tabela 13) (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006).

Tabela 12 - Condutividade térmica das camadas da parede para diferentes tipos de paredes modeladas.

Tipo de condutividade térmica da parede	Condutividade térmica por camada ($Wm^{-1}k^{-1}$)		
	Camada interna	Camada média	Camada externa
Alto	0,82	1,23	1,54
Médio	1,54	1,54	1,54
Baixo	0,16	0,20	0,30

Fonte: adaptado de (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006).

Tabela 13 - Variações nos parâmetros usados para cada simulação

	Fator 01	Fator 02	Fator 03	Fator 04
Modelo	Tamanho das Janelas	Espessura das paredes internas	“K” Parede externa	Região climática
1	Pequena (0,5x0,5)	Sem parede interna	Alto	Baixa Califórnia (BSk)
2	Pequena (0,5x0,5)	0,34m	Baixo	Chiapas (Aw)
3	Pequena (0,5x0,5)	0,60m	Médio	Taumalipas (Bsh)
4	Média (0,5x1)	Sem parede interna	Baixo	Taumalipas (Bsh)
5	Média (0,5x1)	0,34m	Médio	Baixa Califórnia (BSk)
6	Média (0,5x1)	0,60m	Alto	Chiapas (Aw)
7	Grande (0,5x1,5)	Sem parede interna	Médio	Chiapas (Aw)
8	Grande (0,5x1,5)	0,34m	Alto	Taumalipas (Bsh)
9	Grande (0,5x1,5)	0,60m	Baixo	Baixa Califórnia (BSk)

Fonte: adaptado de (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006)

O trabalho apresenta como resultado a análise da influência das janelas, paredes, internas e externas. As janelas grandes tiveram grandes efeitos para elevação da temperatura durante a noite no mês de julho (período quente). As janelas pequenas contribuíram para a maior redução de temperatura durante o ano todo.

A presença ou ausência de paredes internas é um fator que influencia bastante na temperatura dos cômodos. Em termos de atenuação de temperatura, as paredes internas estreitas apresentaram o melhor desempenho durante o ano para todas as regiões analisadas. A baixa condutividade das paredes externas promoveu o equilíbrio entre a temperatura interna e externa, assim como a perda de calor foi reduzida. Em termos de redução de temperatura, a alta condutividade térmica das paredes teve um ótimo desempenho nas cidades de Baixa Califórnia (BSk) e Chiapas (Aw), pois uma parte do calor ficou acumulado nas paredes (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006).

De uma forma geral, durante o período frio, nos meses de janeiro a outubro, a temperatura interna apresentou um bom desempenho, até nas regiões de clima mais rigoroso, como na Baixa Califórnia (BSk). Para a redução de temperatura nas horas quentes dos dias frios, as variáveis apresentaram um bom desempenho nas temperaturas internas de Chiapas (Aw). Durante os dias mais quentes, contra as condições climáticas adversas em baixa Califórnia, observou-se um bom desempenho, quando a temperatura reduziu as variáveis. Durante os dias mais frios dos meses quentes, Chiapas teve o desempenho mais alto devido à fixação das variáveis (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006) (Figura 88 e Figura 89).

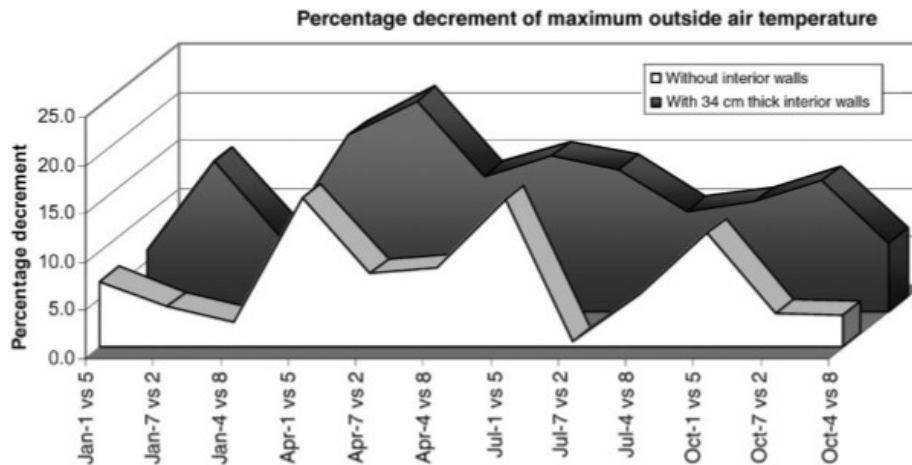


Figura 88 - Percentagem de redução da temperatura do ar interior da temperatura do ar exterior quente ao meio-dia para ensaios com e sem paredes exteriores. Fonte: (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006).

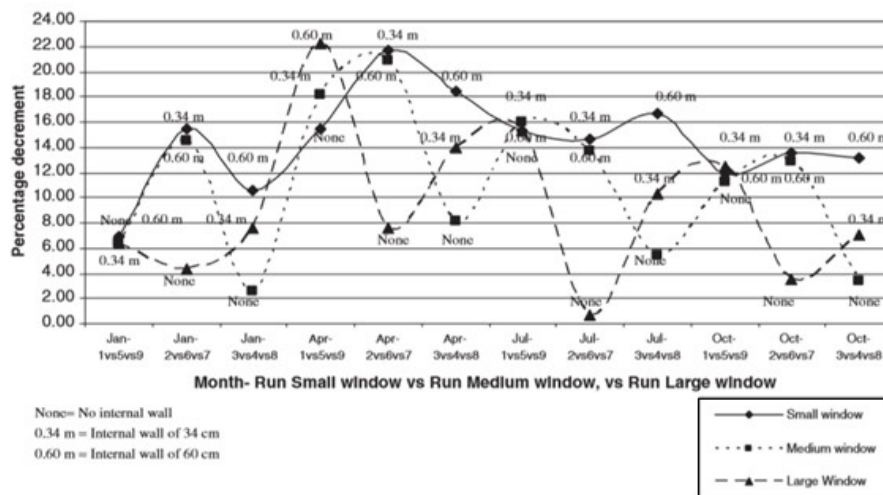


Figura 89 - Diminuição percentual da temperatura exterior máxima com diferentes tamanhos de janela. Fonte: (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006).

Na pesquisa de Desogus et al (2014), foi realizado o monitoramento de uma casa em adobe construída na Sardenha, Itália, a “Casa Mancosu”. Sardenha tem o clima do tipo mediterrâneo (Csa). Durante o verão, verificou-se que apesar das paredes apresentarem um comportamento adequado às necessidades do clima, a cobertura é o ponto fraco, pois é o componente da envoltória que apresenta a maior exposição diária a radiação solar; desse modo, tem maior influência do que as paredes no comportamento térmico do edifício (DESOGUS et al., 2014).

Bruno et al (2010) propõem melhorias para a reabilitação de cabanas tradicionais feitas com tabiques no litoral do Alentejo em, Portugal, região de clima mediterrâneo (Csa). As incrementações propõem adição ou substituição de componentes da alvenaria, cobertura e pavimento. Sobre a alvenaria, propõe-se a construção de um pano de parede de alvenaria de adobe pelo interior das paredes exteriores, ou aumentar um pouco a espessura do revestimento interior de argamassa de terra. Desse modo, pode-se aumentar a inércia térmica da habitação, melhorar o seu conforto térmico e conferir maior segurança à penetração do calor. Quanto à cobertura, para melhorar o isolamento térmico e acústico, recomenda-se, neste estudo, a aplicação de placas de aglomerado de resíduos de cortiça (abundante na zona) entre o fasquiado de cana e o revestimento vegetal de colmo para criar um forro mais opaco. Sobre o pavimento, aconselha-se a manter o revestimento original de argamassa de terra batida ou, em alternativa, propõe-se a aplicação dum revestimento cerâmico com ladrilhos tradicionais de barro vermelho, cozidos a baixa temperatura (Figura 90) (BRUNO and FARIA, 2010).

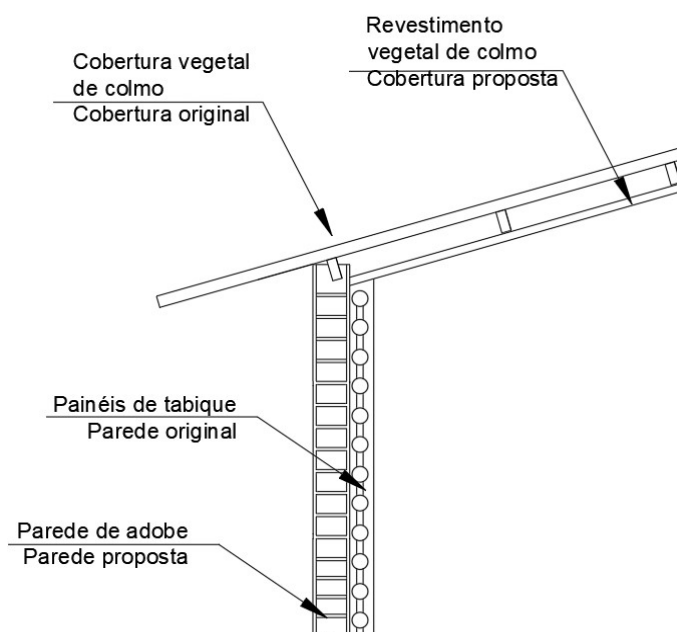


Figura 90 – Esquema de melhorias de cabanas feitas em tabique. Fonte: adaptada de (BRUNO and FARIA, 2010).

A pesquisa de Souza (2016) cataloga soluções da arquitetura colonial brasileira com influência muçulmana que promovem o conforto térmico, como as paredes de terra (taipa de pilão, pau a pique e adobe) revestidas com cal e azulejo; sistemas de fechamento de vão como gelsias, rótulas e muxarabis e soluções espaciais como pátios internos. Estas soluções foram muito utilizadas até o início do século XIX. Os revestimentos feitos de barro, areia e cal, eram

normalmente caiados de cor branca ou azulejos, que, para além do aspecto estético contribuem para reflexão dos raios solares. No caso das esquadrias, o estudo assinala o uso de elementos vazados como as gelosias e muxarabis como solução para a ventilação sem insolação direta. Em casas de edificações populares, para os vãos são adotadas as janelas de “taquara” ou “urupema”, à semelhança das peneiras, ou crivos. Neste catálogo é também assinalado o uso de pátios internos em edifícios públicos, religiosos e particulares, com vegetação e fonte de água no centro (Figura 91 e Figura 92) (SOUZA, 2016).

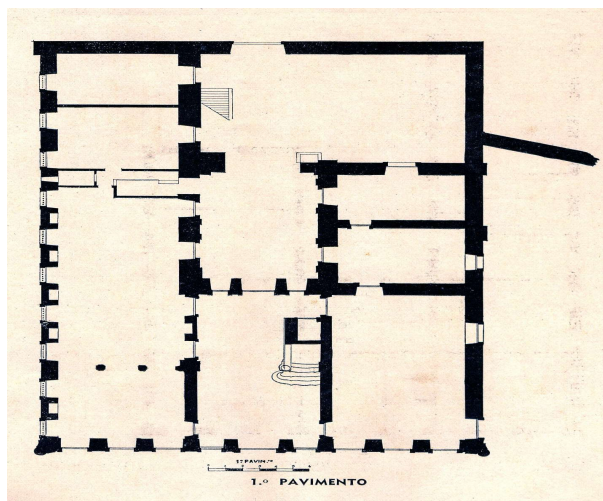
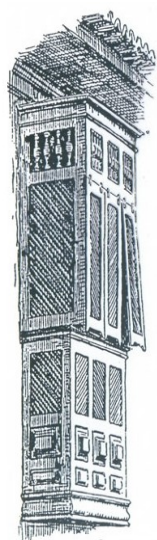


Figura 91 – Muxarabi. Fonte: Figura 92 – Pátio Interno. Fonte: (SOUZA, 2016)
(SOUZA, 2016)

Das pesquisas citadas, pode-se concluir que, em qualquer construção, não se deve analisar isoladamente as performances térmicas das paredes de terra. Deve ser feita uma análise do conjunto arquitetônico para averiguar as propriedades térmicas da cobertura e do piso (que não necessitam ser em terra) e a existência ou não de massa térmica interna (HEATHCOTE, 2011). Desse modo, pode-se concluir que em climas do tipo Aw, as paredes internas esbeltas contribuem para atenuação do calor e janelas grandes (0,5x1,5m) contribuem para o calor no período quente (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006) e (REMPEL and REMPEL, 2013). Em climas temperados do tipo Cwa, recomenda-se o uso de coberturas leves com forro de madeira, camara de ar com 10cm, paredes de adobe com 14cm (BRUNO and FARIA, 2010). No clima Csa, recomenda-se o uso de forros com materiais de baixa condutividade térmica, com placas de aglomerado de cortiça e paredes externas devem ser grossas, com argamassas internas de terra (FRANCISCO, 2011). No clima Bsh, paredes internas esbeltas e Janelas pequenas (0,5x0,5m) contribuem para atenuação do calor (34cm) por ser um clima quente e seco, com

dias quentes e noites frias. No clima BSk as paredes externas grossas (60cm) contribuem para o aumento do calor noturno e paredes internas esbeltas (30cm) e janelas pequenas (0,5x0,5m) contribuem para a redução do calor (Tabela 14).

Tabela 14 – Recomendações para habitações em adobe em climas

Clima	Coberturas	Paredes	Aberturas
Aw*	NA	Paredes internas esbeltas contribuem para atenuação do calor (34cm) Paredes grossas (60cm)	Janelas grandes contribuem para o calor no período quente.
Bsh *	NA	Paredes internas esbeltas contribuem para redução do calor (34cm)	Janelas pequenas contribuem para atenuação das temperaturas o ano inteiro.
BSk *	NA	Paredes interna esbeltas contribuem para redução do calor Paredes externas esbeltas (30cm) contribuem para o calor noturno Paredes de 30 a 60cm não contribuem para o aquecimento diurno	Janelas pequenas (0,5x0,5m) contribuem para atenuação das temperaturas o ano inteiro.
Cwa **	Cobertura com forro leves, (madeira de pinus revestidas com argamassa de terra. + câmara de ar de 10cm)	Paredes de adobe esbeltas (14cm),	NA
Csa ***	Coberturas isoladas	Paredes externa de terra grossas com argamassa internas de terra.	NA

* (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006) e (REMPEL and REMPEL, 2013)

** (FRANCISCO, 2011)

5. ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PARA O BRASIL

Uma arquitetura adaptada às condições climáticas locais permite uma redução do consumo energético e, conseqüentemente, uma redução dos custos para o funcionamento do mesmo

(FROTA and SCHIFFER, 1995). De modo a garantir o bom conforto das edificações no vasto território brasileiro, foi criado em 2005 a *NBR 15520: Desempenho térmico de edificações (ABNT 2005)*, que se baseia nos conceitos da arquitetura bioclimática, um conjunto de recomendações para garantir o desempenho térmico das edificações. As diretrizes apresentadas são direcionadas para a implantação, materiais da envoltória e ventilação dos edifícios para cada clima específico, podendo atender à refrigeração ou aquecimento passivo (GIVONI, 1992) (Figura 93).



Figura 93 - Estratégias de aquecimento e resfriamento. Fonte: (LAMBERTS and DUTRA, 2014).

5.1. CLASSIFICAÇÕES CLIMATÉRICAS

As condições climáticas são diversas sobre o globo terrestre e para as estudar foram criadas diversas classificações baseadas nos tipos de vegetação, precipitação, temperatura, evaporação e massa de ar. Dentre as classificações, destacam-se as de Köppen (1936), Thornthwaite (1948), Miller (1931) e Strahler (2005). Para esta pesquisa enquadrada no Nordeste do Brasil, utilizou-se as de Köppen (1936) e Thornthwaite (1948), pois são, segundo Nóbrega (2010), as que permitem a melhor compreensão dos climas tropicais.

Devido a sua extensão territorial, o relevo e a dinâmica das massas de ar, o Brasil apresenta uma grande diversidade climática. Dentre os fatores apresentados, destacam-se as massas de ar que influenciam diretamente a temperatura e a pluviosidade, provocando as diferenciações climáticas regionais (NOBREGA, 2010).

As classificações climáticas de Köppen-Geiger são construídas a partir da distribuição anual e mensal da precipitação pluviométrica e da temperatura, dividindo os climas em 5 grupos:

- o grupo A reúne climas tropicais, que apresentam temperatura médias de 18 °C ou superior, e altos índices de precipitação pluviométrica;
- o grupo B, por sua vez, agrupa climas secos, sejam áridos ou semiáridos, caracterizados pelo baixo nível de precipitação ao longo do ano;
- o grupo C, que reúne climas temperados, com o mês mais frio com temperaturas entre -3 a 18 °C e pelo menos um mês com média acima de 10 °C;
- o grupo D reúne climas continentais e subárticos, apresentando pelo menos um mês com temperaturas médias abaixo de 0 °C ou -3 °C, e pelo menos um mês com média acima de 10 °C,
- por fim o grupo E, que abrange os climas polares e alpinos, em que todos os meses do ano têm uma temperatura média inferior a 10 °C (PEEL, FINLAYSON, and MCMAHON, 2007).

O Brasil se enquadra nos climas do tipo A, B e C, 92% do território está localizado entre os trópicos e os restantes 8% na zona temperada:

- Os climas do tipo A abrangem climas quentes e úmidos como o equatorial úmido (Af), o tropical de monção (Am), o tropical de savana com estação seca de inverno (Aw). Estes abrangem grande parte do território nacional, havendo maior concentração na região norte do país.
- Os climas tipo B são do tipo climas quentes e secos, como o árido desértico seco e quente (BWh) e semiárido seco e quente e semiárido seco e quente (BSh) com concentração na região nordeste do território nacional.
- Quanto aos climas do tipo C, correspondem a climas mais frios com alta umidade como: subtropical úmido (Cfa), temperado úmido com verão quente (Cfb), temperado úmido com verão temperado (Cwa), temperado úmido com inverno seco e verão morno (Cwb) (Tabela 15 e Figura 94).

Tabela 15 - Tipos climáticos de Koppen-Geiger para o Brasil.

Af	Equatorial úmido
Am	Tropical de monção (chuvas no verão)
Aw	Tropical de savana com estação seca de inverno
BWh	Árido desértico seco e quente
BSh	Semiárido seco e quente
Cfa	Subtropical úmido
Cfb	Temperado úmido com verão quente
Cwa	temperado úmido com verão temperado
Cwb	Temperado úmido com inverno seco e verão morno

Fonte: (SAMPAIO et al., 2011).

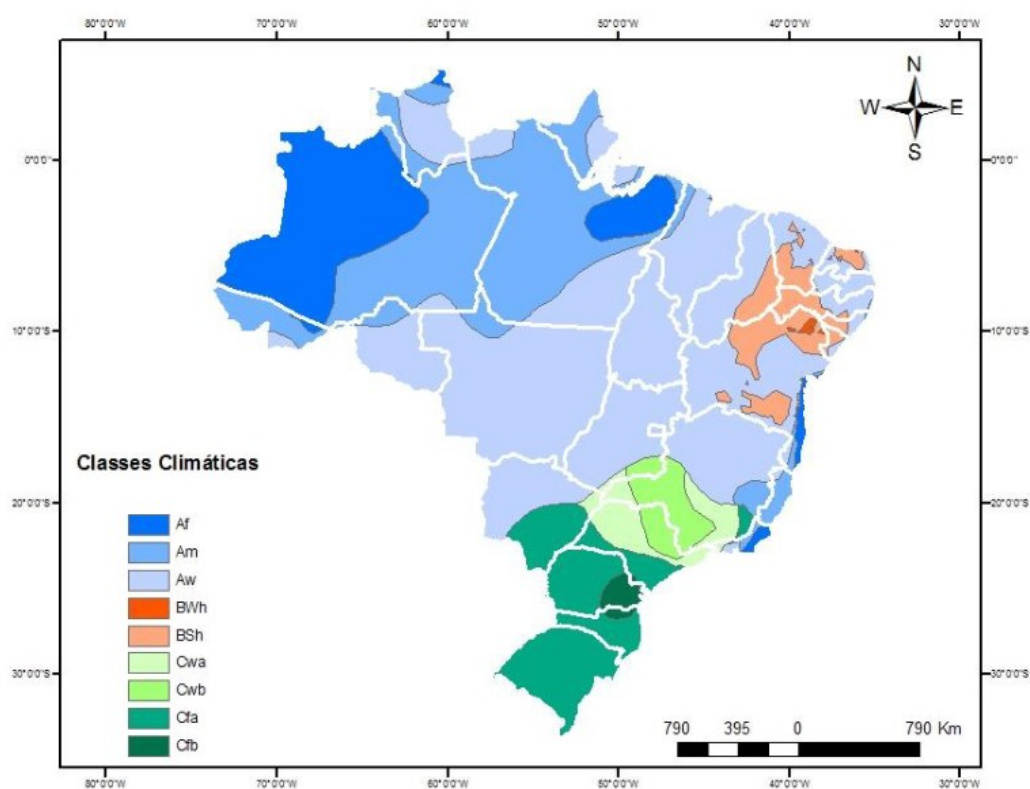


Figura 94 - Classificação climática Koppen. Fonte: (SAMPAIO et al. 2011)

A classificação de Thornthwaite avalia a efetividade da precipitação através do índice de umidade total (Im), que é a relação entre a precipitação e a evapotranspiração. A classificação de Thornthwaite é dividida em 5 classes A, B, C e D, de acordo com a escala de umidade, do muito úmido ao seco (NOBREGA, 2010):

- A categoria A agrupa os climas super-úmidos com índice de umidade acima de 100, concentrando-se nas regiões mais isoladas da floresta amazônica, no extremo noroeste do território brasileiro com $Im \geq 100$.
- A categoria B abrange climas úmidos e se subdivide nos climas B1, B2, B3 e B4. Os tipos climáticos B1 e B2, concentrados nas regiões Sudeste e Centro Oeste, apresentam moderados índices de umidades, variando de $40 \leq Im < 60$ e $20 \leq Im < 40$, respectivamente. Os climas B3 e B4, localizados nas regiões Norte e Sul do país, apresentam os mais elevados índices de umidades de $80 \leq Im < 100$ e $60 \leq Im < 80$ respectivamente.
- A classificação C, das regiões Centro Oeste e Nordeste, é composta por climas sub-úmidos do tipo C2, apresentando índices de umidade entre $0 \leq Im < 20$ e C1, sub-úmido seco com $-20 \leq Im < 0$.
- Por fim, as classificações D e E agrupam regiões com clima semiárido e árido, índices de umidade negativo, isto é, a evapotranspiração é maior que a precipitação, $-40 \leq Im < -20$ e $-60 \leq Im < -40$, respectivamente. Ambos os climas se localizam na região Nordeste, sendo o clima D de maior abrangência (SAMPAIO et al. 2011) (Tabela 16 e Figura 95).

Tabela 16 –Tipos climáticos segundo Thornthwaite –1948, baseados no índice de umidade.

Tipos Climáticos		Índice de Umidade (Im)
A	Super-úmido	$Im \geq 100$
B4	Úmido	$80 \leq Im < 100$
B3	Úmido	$60 \leq Im < 80$
B2	Úmido	$40 \leq Im < 60$
B1	Úmido	$20 \leq Im < 40$
C2	Sub-úmido	$0 \leq Im < 20$
C1	Sub-úmido seco	$-20 \leq Im < 0$
D	Semiárido	$-40 \leq Im < -20$
E	Árido	$-60 \leq Im < -40$

Fonte: (SAMPAIO et al., 2011)

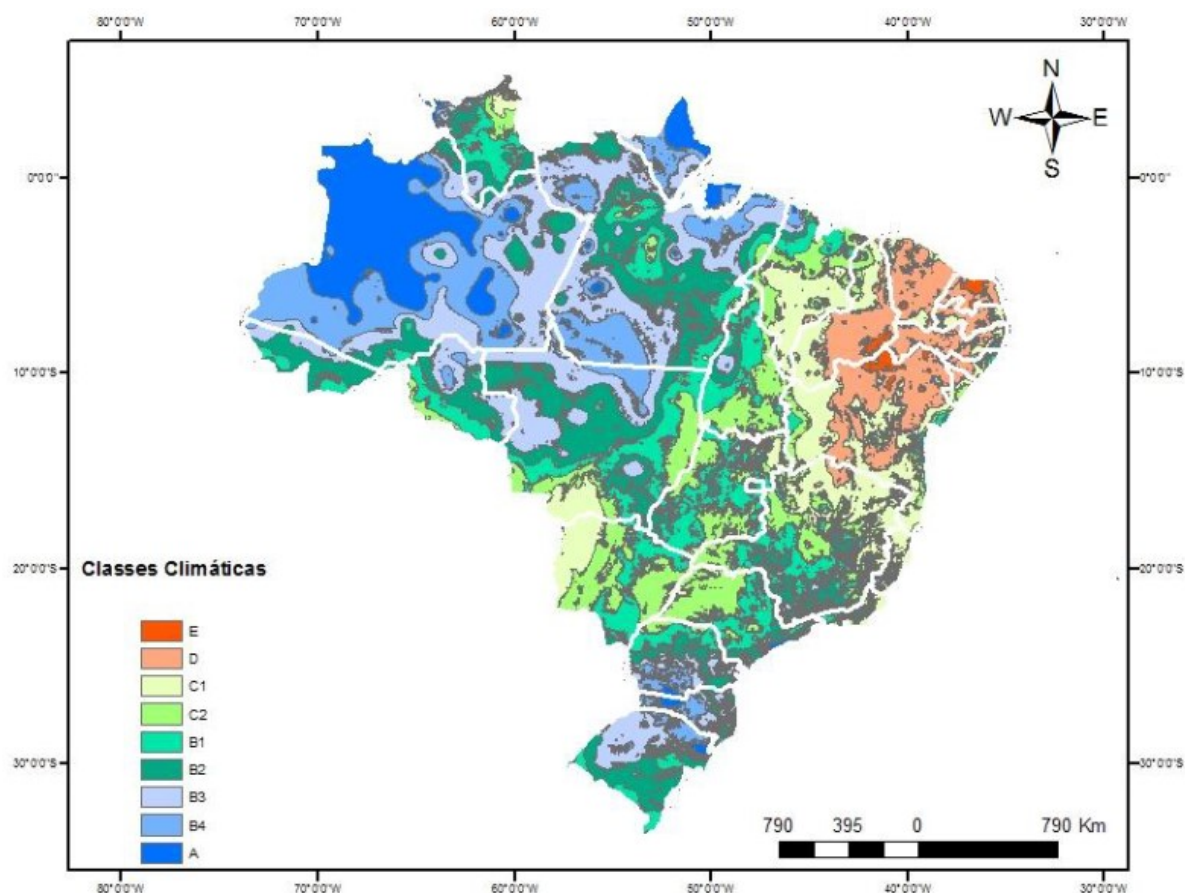


Figura 95 - Classificação climática de Thornthwaite para o Brasil. Fonte (SAMPAIO et al., 2011).

Ao comparar as classes climáticas de Koppen-Geiger e Thornthwe para o Brasil através da matriz elaborada por Sampaio e al (2011) da tabela 3, percebe-se que a maioria das classes climáticas de Koppen-Geiger apresentam interações com as categorias de Thornthwaite, devido à sua abrangência. A matriz mostra uma forte interação entre os sistemas nos tipos climáticos secos (B): áridos (Bsh) e semiáridos (Bwh). Porém, para os climas tropicais (A) e sub-tropicais (B), as classes de Koppen-Geiger não apresentam interações tão fortes com as de Thornthwaite, visto que esses climas interagiram com os tipos climáticos caracterizados como úmidos. Assim, o tipo climático super-úmido (A) de Thornthwaite foi aquela classificação que apresentou menor interação (SAMPAIO et al, 2011) (Tabela 17).

Tabela 17 – Matriz de comparação entre as classes climáticas de Koppen-Geiger e Thornthwe

	E	D	C1	C2	B1	B2	B3	B4	A
Af	0	0,6	6,9	12,8	10,3	12,1	20,8	28,5	8,1
Am	0	0,1	2,5	9,9	13,0	21,9	25,8	21	5,8
Aw	0,5	5,2	13,9	21,2	21,7	19,1	12,7	4,9	0,8
Bwh	63,0	25,9	11,1	0	0	0	0	0	0
BSh	21,7	36,5	38,2	3,5	0,1	0	0	0	0
Cfa	0	0	2,2	14,2	24,3	20,8	20,3	11,2	3,5
Cfb	0	0	7,0	14,7	28	28,1	29,4	5,5	1,2
Cwa	0	0	2,2	6,4	15,9	19,1	43,8	21,8	6,4
Cwb	0	0	0,9	2,9	0	32,7	0	18,8	1,8

Fonte: (SAMPAIO et al, 2011).

A arquitetura bioclimática tem como base as cartas bioclimáticas aplicadas às edificações. As cartas climáticas apresentam estratégias arquitetônicas para se atingir a zona de conforto em cada clima, sendo construídas a partir da relação de temperatura e umidade. Dentre as cartas produzidas ao longo dos anos, destacam-se as cartas de Olygay (1973), Giovanni (1992), o Diagrama de Szololay (1987) e a Metodologia de Watson e Labts (1983). A carta de Giovani (Figura 92) tem a maior aplicabilidade no clima brasileiro, pois foi desenvolvida para países quentes em desenvolvimento, sendo validada em cidades de clima quente úmido na Tailândia, levando em consideração a ventilação em temperaturas mais elevadas (BOGO, n.d.) e tendo sido adotada como base para construção do zoneamento bioclimático brasileiro (ABNT 2005).

O Zoneamento Bioclimático Brasileiro apresenta recomendações gerais para aquecimento ou resfriamento das edificações e diretrizes específicas, como parâmetros das propriedades térmicas dos materiais, envoltória e dimensionamento de aberturas. O zoneamento divide o território brasileiro em 8 zonas relativamente homogêneas quanto ao clima (Figura 96).

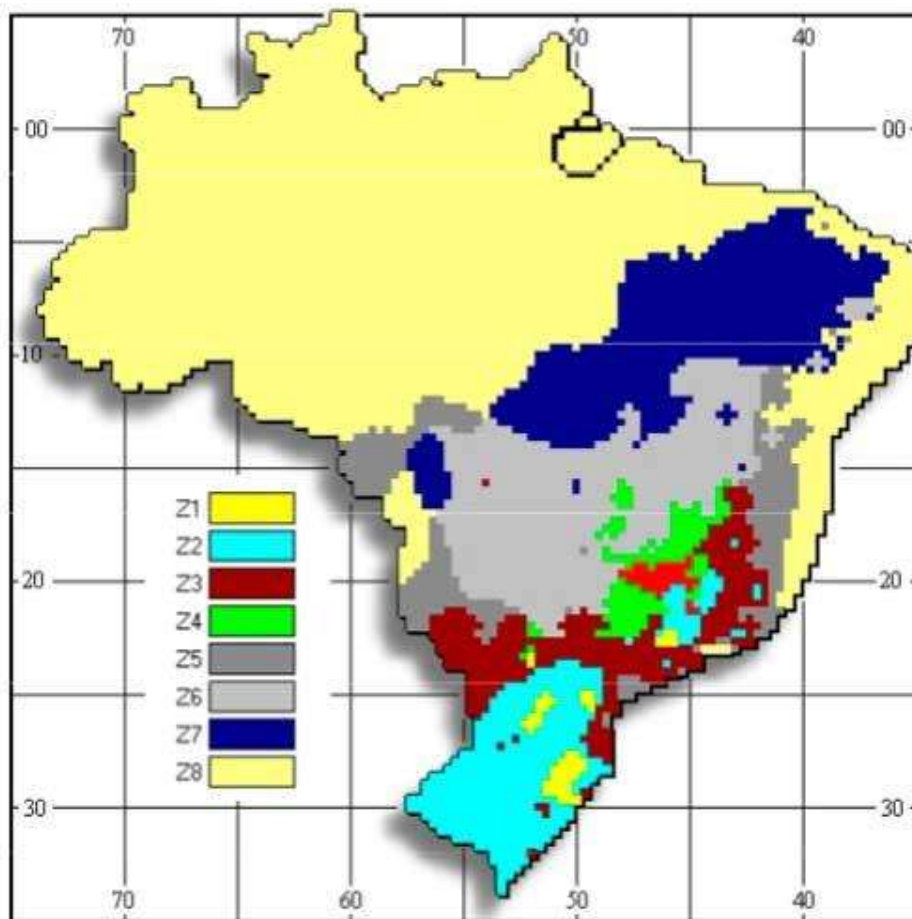


Figura 96 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Fonte: (ABNT, 2005)

Dentro destas zonas são definidas 11 estratégias bioclimáticas baseadas nos perfis climáticos.

As estratégias de A, B e C são voltadas para edificações situadas em climas frios:

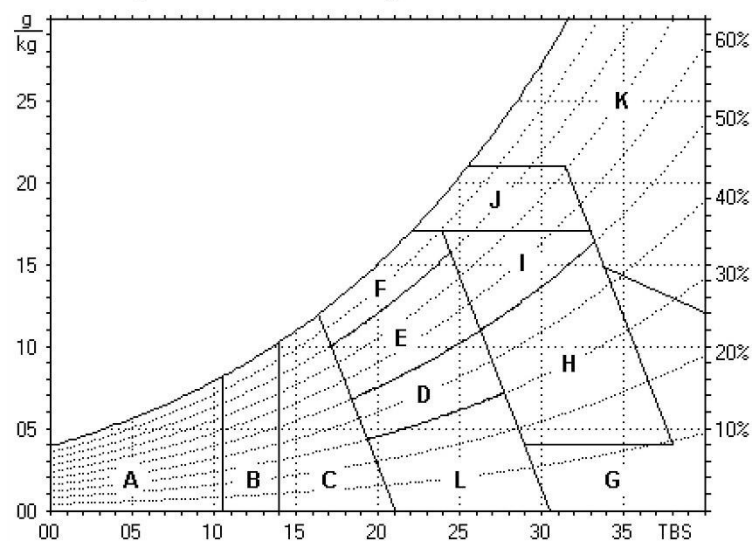
- O conjunto de estratégias A apontam para o uso de aquecimento artificial, considerando períodos do ano em que as estratégias passivas são inviáveis para manter o conforto térmico.
- A estratégia B aponta para o uso de aquecimento solar da edificação.
- Já a estratégia C recomenda o uso de massa térmica para aquecimento.

As estratégias D e E estão ligadas a climas amenos, cujas edificações não necessitam de muitos incrementos para atingirem a zona de conforto:

- A estratégia D aponta para a retirada do excesso de umidade sem necessidade de estratégias específicas, pois o clima se enquadra na zona de conforto.
- Na classificação E, o clima se encontra dentro da zona de conforto, pois não há necessidade de uso de estratégias específicas.

Ligadas a climas quentes e úmidos e quentes e secos, o conjunto de estratégias F, G+H, H+I, I + J, K e L são voltadas para climas quentes, variando de acordo com a quantidade de umidade e a possibilidade de uso ou não da ventilação (ABNT, 2005):

- A estratégia F atende a climas quentes e úmidos, onde se sugere a renovação do ar.
- Por sua vez, a estratégia G + F, apresenta recomendações de resfriamento evaporativo, de modo a amenizar as condições do clima quente e seco.
- Nas estratégias H + I, abrange-se o uso de massa térmica de refrigeração, pois o clima é quente e seco e apresenta uma alta amplitude térmica.
- As I+J apontam para o uso da ventilação como estratégia de retirada do calor.
- Por fim, a K sugere o uso da refrigeração artificial pelo fato das estratégias passivas não serem suficientes para atingir o conforto térmico.



LEGENDA

A	Aquecimento artificial
B	Aquecimento solar da edificação
C	Massa térmica de aquecimento
D	Conforto térmico, em baixa umidade
E	Conforto térmico
F	Desumidificação (Ventilação)
G+H	Resfriamento evaporativo
H+I	Massa térmica de refrigeração
I+J	Ventilação
K	Refrigeração natural
L	Umidificação do ar

Figura 97 -Carta bioclimática, adaptada de Givoni. Fonte: (ABNT, 2005)

5.2. ESTRATÉGIAS DE APOIO AO PROJETO DE ARQUITETURA

A partir das recomendações bioclimáticas da carta de Givoni, da NBR 15220, NBR 15575 e da informação de alguns pesquisadores, (WESTPHAL, 2007) e (FERREIRA et al, 2014) são apresentadas diretrizes bioclimáticas agrupadas em 3 categorias: implantação, aberturas e envoltórias e piso. Implantação, onde se apresentam recomendações sobre: orientação, planta de situação e espaçamento entre construções. Aberturas e renovação de ar, com recomendações sobre circulação do ar, dimensões das aberturas e posição das aberturas. Por fim, envoltórias e piso, onde são apresentados parâmetros como absorvância, transmitância e capacidade térmica para coberturas, paredes e piso.

5.2.1. IMPLANTAÇÃO

As estratégias de implantação devem auxiliar na captação ou proteção da radiação solar ou ventilação. Desse modo se dividem em 3 categorias: planta de situação, orientação e espaçamento entre as construções.

A planta de situação abrange edificações com plantas compactas ou longitudinais. As edificações compactas servem como barreiras contra a radiação solar direta e reduzem as captações dos ventos, enquanto as longitudinais permitem na fachada de maior comprimento a captação de radiação e ventilação (Figura 98) (FERREIRA et al, 2014).

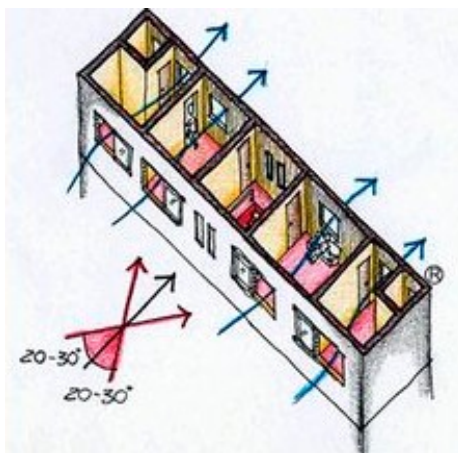


Figura 98 - Planta de situação. Fonte: (PROJETEEE, 2020)

Além da forma da planta, outro elemento que influencia o desempenho do edifício é o uso de pátios internos dotados de vegetação que, em climas quentes, permitem o resfriamento através da evapotranspiração e umidificação do ar.

Na forma da edificação, as orientações das fachadas permitem maior ou menor captação e radiação solar ou ventilação. No caso da radiação, os cômodos voltados para leste ou oeste recebem mais radiação do que os outros (LAMBERTS, 2016). Assim, se recomenda o uso de unidades habitacionais padronizadas dispostas em diferentes orientações solares (Figura 99).



Figura 99 – Orientação dos cômodos. Fonte: (LAMBERTS, 2016).

Já o espaçamento entre construções apresenta duas tipologias de casas: geminadas ou espaçadas. As casas geminadas reduzem a quantidade de área da envoltória expostas à radiação solar ou à ventilação

(Figura 101). Por sua vez, as casas espaçadas permitem a livre circulação de ventos e a exposição direta à radiação solar (FERREIRA et al, 2014).



Figura 100 - Espaçamento entre as construções. Fonte: (LENGEN, 1996)

5.2.2. ABERTURAS E RENOVAÇÃO DE AR

A ventilação natural após o sombreamento é a estratégia bioclimática mais importante. A ventilação permite o resfriamento natural do ambiente construído através da substituição do ar interno (mais quente) pelo externo (mais frio), permitindo a desumidificação do ar através da sua renovação. Porém, a ventilação natural tem maior eficiência em temperaturas ambientes entre 20 e 32°C; acima disso, os ganhos térmicos funcionam mais como aquecimento do ambiente. Dentro dessa escala, entre 27 e 32°C, a ventilação só é eficiente se a umidade relativa do ar estiver entre 15% e 75%, pelo que a ventilação em determinados climas pode ser desejável somente no verão (LAMBERTS, 2016) (Tabela 18). No Brasil, no entanto, mais de 50% das cidades necessitam de ventilação durante o ano inteiro (ABNT, 2005).

Tabela 18 – Aberturas para ventilação.

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	$10 < A < 15\%$
Médias	$15 < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

Fonte: (ABNT 2005)

A eficiência do projeto de ventilação passiva está diretamente ligada à dimensão dos espaços internos e ao tamanho e localização das aberturas. As aberturas para as paredes, segundo a NBR 15220, são classificadas como pequenas, médias e grandes, a partir da proporção da área do ambiente (Tabela 9) (ABNT, 2005). Os tipos de aberturas para cômodos são aberturas controláveis na parede, vãos e elementos fixos na parede, abertura nas coberturas fixas (PROJETEEE 2020) (Figura 101).

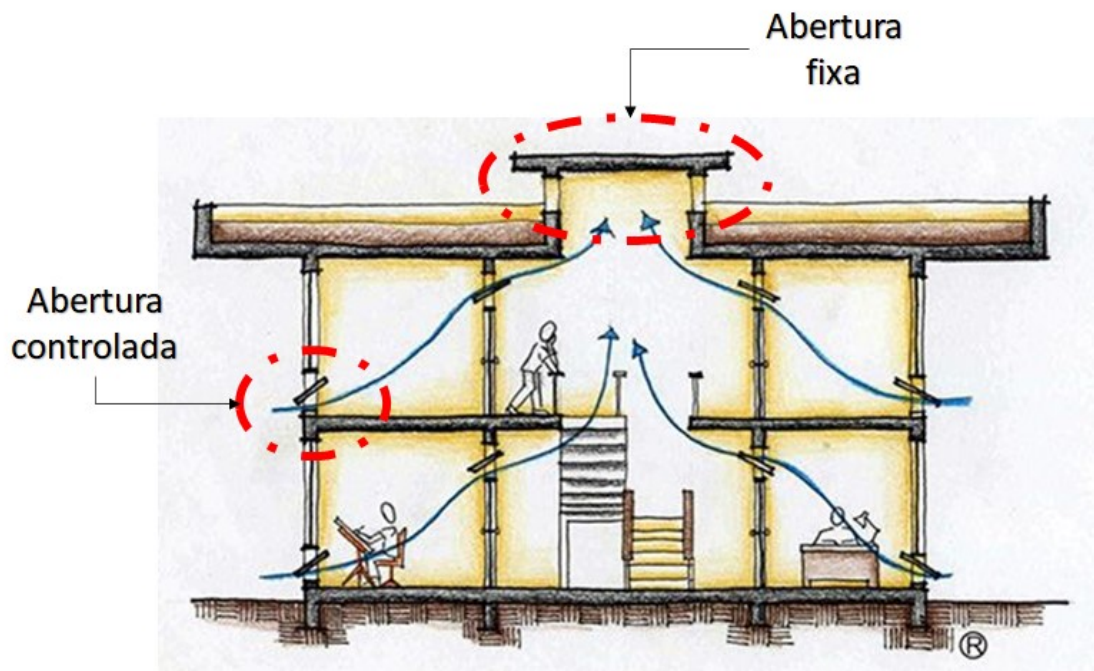


Figura 101 - tipos de aberturas para cômodos aberturas controláveis e fixas (PROJETEEE 2020).

Os **sistemas de sombreamento** ou sistemas de proteção à radiação tem como função proteger o edifício ou os espaços abertos das radiações indesejadas nos períodos quentes. No Brasil, as estratégias aplicadas ao edifício devem evitar os ganhos solares nos períodos mais quentes, do dia e do ano, sem os obstruir no inverno e prejudicar a iluminação natural através das aberturas (Figura 102). O projeto do edifício deve considerar que a própria volumetria e a vegetação do entorno podem gerar o sombreamento do prédio. Deve-se considerar quais as fachadas que devem ter maior ou menor proteção solar (PROJETEEE, 2020).

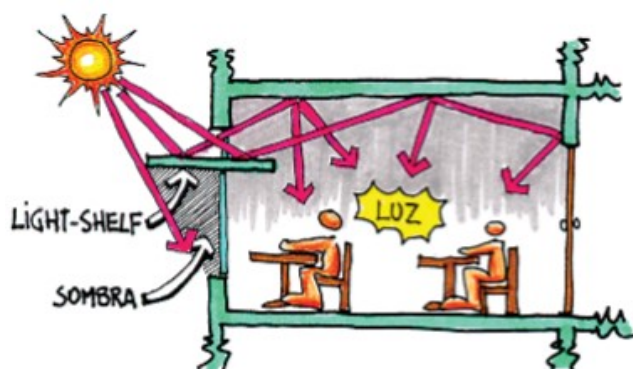
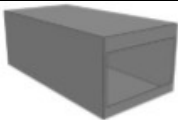
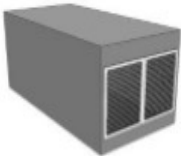
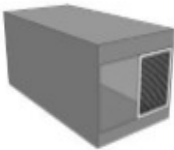
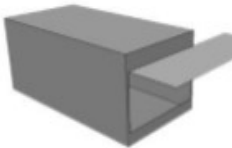


Figura 102 - Sistemas de proteção à radiação. Fonte: (LAMBERTS, DUTRA, and PEREIRA 2014)

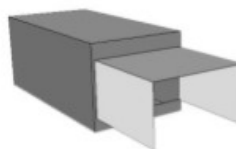
Sorgato (2013) constatou que as janelas sombreadas chegam a contribuir com a diminuição de até 1,5°C, se comparadas com janelas não sombreadas para o verão nas ZB-3 e ZB-8. Paredes isoladas combinadas com sombreamento contribuem também para a redução das temperaturas internas (SORGATO, VERSAGE, and LAMBERTS, 2011). Porém, o sombreamento das paredes por si só, sem ventilação ou isolamento, não apresenta uma contribuição relevante (RODRIGUES et al., n.d.). A influência do sombreamento varia com o tipo de dispositivo, orientação e zona bioclimática em que a edificação se encontra.

Na pesquisa de Souza et al (2018), foram testados através de simulações térmicas 8 tipos de dispositivos de sombreamento nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras. Os dispositivos avaliados foram: sem proteção (SP), protótipo com veneziana externa definida de acordo com o modelo adotado para a elaboração do RTQ-R (VRTQR), protótipo com veneziana com abertura completa da área (V90), protótipo com veneziana com abertura de até 45% da área (V45), protótipo com dispositivos de proteção solar horizontais definidos pelo método das latitudes do RTQ-R (L23), protótipo com dispositivos de proteção solar (TN), protótipo com dispositivo dimensionado para sombreamento entre 7h40 e 16h20 (aproximadamente 70% das horas de insolação) – placa inteira (PTI) e protótipo com dispositivo de proteção solar para sombreamento das 7h40 às 16h20 (70% das horas de insolação) – placas filetadas (PTF) (SOUZA et al, 2018) (Tabela 19).

Tabela 19 – Aberturas para ventilação.

ID	Modelo	Descrição
SP		Base para investigar o impacto das proteções nos ambientes em estudo. Modelo sem dispositivos de proteção e, portanto, não sujeito a pontuação pela variável Somb do RTQ-R.
VRTQR		Essas venezianas foram modeladas sempre acionadas (fechadas) para as zonas 6 a 8 no período de 8h às 18h e, para as zonas 1 a 4, fechadas no verão (21 de setembro a 20 de março) e abertas durante o inverno (21 março a 20 setembro) (LABORATÓRIO..., 2011b). A veneziana foi modelada no EnergyPlus através do item Window material: Blind
V90		Venezianas que apresentam envidraçamento em toda a área do vão da abertura com quatro folhas, sendo duas compostas por venezianas e duas envidraçadas. Acionamento determinado pelo algoritmo Ligthswitch do Daysim
V45		Apresenta envidraçamento de 45% do vão da abertura, ou seja, o restante fechado por veneziana. Caracterizada por três folhas, sendo duas compostas de venezianas e uma envidraçada. O acionamento dessa veneziana foi determinado pelo algoritmo Ligthswitch do Daysim, assim como a V90.
L23		Este protótipo foi baseado no texto do RTQ-R, que objetiva uma maneira simplificada de mensurar o sombreamento realizado por varandas, beirais e brises horizontais, podendo alcançar valores de Somb de até 0,2.
TN		Este protótipo foi definido a partir do dimensionamento das proteções pelo método de avaliação do Anexo 1 do RTQ-R, podendo alcançar valores de Somb de até 0,5.

PTI



O protótipo PTI foi idealizado para que não houvesse insolação incidente na abertura entre 7h40 e 16h20, de acordo com o horário proposto por Guedes (2012). Foi prevista uma composição de placas inteiras horizontais e verticais

PTF



Este protótipo é caracterizado da mesma forma que o anterior. Porém, neste caso, procurou-se filetar as proteções a fim de investigar a influência da forma do dispositivo e o impacto de maiores superfícies refletivas quanto ao desempenho térmico e luminoso.

Fonte: (SOUZA et al, 2018)

Os métodos que apresentaram maior eficiência foram os modelos PTI e PTF, que permitiram o sombreamento total das aberturas durante o dia, evitando a insolação direta nos ambientes internos. O modelo L23 apresentou o pior desempenho, por apresentar elementos de proteção solar somente na horizontal. As zonas sobre as quais o sombreamento teve maior impacto na redução dos graus horas de resfriamento e aquecimento foram as zonas bioclimáticas 3 e 4, chegando a ter uma redução de 40% em relação ao modelo sem sombreamento. A zona 7 foi a que apresentou a menor influência sobre os graus horas, variando de 0 a 14%, dependendo do sistema de proteção solar da orientação escolhida (SOUZA et al, 2018).

Assim, conclui-se que o sombreamento das esquadrias em qualquer zona bioclimática brasileira pode trazer uma redução das temperaturas interiores, sendo que os modelos que permitem o sombreamento total são aqueles que apresentam a maior redução de temperaturas internas. Apenas a zona bioclimática 7 apresenta um baixo impacto se comparado às demais.

5.2.3. ENVOLTÓRIA

A envoltória dos edifícios é composta pelas paredes e coberturas e pode ser do tipo pesada ou leve. Os materiais que a compõem apresentam massas térmicas que podem contribuir para o aquecimento ou resfriamento do edifício. A definição da envoltória irá definir o desempenho térmico da construção. A absorvância e refletância são propriedades térmicas que estão ligadas diretamente à pigmentação das superfícies dos materiais de construção, a absorvância e a refletância:

- A **absorvância** é a taxa de calor absorvido dividido pela taxa de radiação incidente. Quando as paredes ou coberturas são leves refletoras, é porque apresentam baixos valores de absorvância (α). A envoltória leve apresenta uma baixa inércia térmica com

transmitâncias de $U \leq 3,00 \text{ W/m}^2\text{.K}$, um atraso térmico com valores de $\phi \leq 4,3$ e fator solar $\text{FSO} \leq 5,0$ e se subdividem em leves refletoras e leves isoladas (ABNT, 2005).

- A **refletância** é a taxa de calor refletido pela taxa de radiação incidente sobre a mesma superfície. As cores apresentam forte influência no ganho de calor das superfícies dos materiais de construção. As superfícies de cores escuras, por apresentarem refletância mais alta do que as cores claras, apresentam um maior ganho de calor. A cor branca apresenta 85% de refletância e a cor preta 4%. Assim, quando se deseja dissipar energia, recomenda-se o uso de cores com tonalidades claras. (VEADO, 2008). A NBR 15220 aponta que as cores claras possuem baixa absorvância (ABNT, 2005) (Tabela 20).

Tabela 20 – Parâmetros paredes e coberturas leves

Tipo de envoltória		Transmitância térmica - Atraso térmico - ϕ Fator solar - FSO		
		U		
		$\text{W/m}^2\text{.K}$	Horas	%
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$\text{FSO} \leq 5,0$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$\text{FSO} \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30\text{.FT}$	$\phi \leq 3,3$	$\text{FSO} \leq 6,5$

Fonte: (ABNT, 2005)

Coberturas leves e isoladas apresentam baixos valores de transmitância térmica com $U \leq 2,00 \text{ W/m}^2\text{.K}$. Assim, o isolamento térmico é uma estratégia para dificultar a dissipação de calor nos edifícios, podendo ser usado em piso, paredes e coberturas com materiais com valores de baixa condutividade térmica que apresentam valores abaixo de $0,045 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Dentre os materiais usuais na construção civil, destacam-se as lãs inorgânicas fibrosas, como lã de vidro ou lã de rocha ou espumas orgânicas, do tipo poliestireno expandido e extrudido e, em menor proporção, o poliuretano (Tabela 21) (HABIB, 2014).

Tabela 21– Materiais isolantes para edifícios.

Materiais isolantes	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
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 extrudado	25-40	0,035	1,42
espuma rígida de poliuretano	30-40	0,030	1,67

Fonte: (ABNT, 2005)

As paredes pesadas devem ter $U \leq 2,20$, $\phi \geq 6,5$ e $FS_o \leq 3,5$, enquanto as coberturas pesadas $U \leq 2,00$; $\phi \geq 6,5$ e $FS_o \leq 6,5$. Um exemplo de envoltórias pesadas são paredes de terra crua, paredes de trombe e coberturas verdes. Esses materiais apresentam elevados valores de calor específico, massa térmica e componentes de largas espessuras, isto é, acima de 30cm (REMPEL and REMPEL, 2013) (Tabela 22).

Tabela 22 – Parâmetros das paredes pesadas

Tipo de envoltória	Transmitância térmica - U	Atraso térmico - ϕ	Fator solar - FS_o
	W/m ² .K	Horas	%
Paredes	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FS_o \leq 3,5$
Coberturas	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	$FS_o \leq 6,5$

Fonte: (ABNT, 2005)

As envoltórias leves são recomendadas para climas tropicais de modo evitar concentração de umidade nas paredes. Enquanto as paredes são usais nos climas temperados, áridos e semiárido de modo atingir uma boa inércia térmica. O uso de isolamento térmico não é recomendado a nenhum tipo climático (ABNT, 2005).

A inércia térmica é a capacidade dos materiais e componentes de armazenar calor, o que permite a redução das amplitudes térmicas internas e um atraso térmico no fluxo de calor, seja para perder

ou ganhar calor para o ambiente. Os componentes de um sistema de inércia térmica em climas temperados, quentes e secos funcionam como uma espécie de bateria térmica: durante o dia absorvem o calor, mantendo a edificação confortável; no inverno, se bem orientado, podem armazenar o calor para liberá-lo à noite, ajudando a edificação a permanecer aquecida. Assim, para que o edifício atinja uma elevada inércia térmica, a envoltória deve ser composta por materiais geralmente densos, de elevada capacidade térmica (LAMBERTS, 2016). Este tipo de estratégia deve ser aplicado a esses componentes com muito critério, procurando minimizar os ganhos solares através de isolamento térmico externo ou sombreamento no período diurno.

Ao contrário do que acontece na maioria do país, no sul do Brasil com clima temperado semelhante ao Europeu, recomenda-se ponderar o uso de coberturas e paredes de alta inércia térmica a oeste, pois podem acumular muito calor durante maior parte do ano e provocar um elevado desconforto térmico no verão. De modo a ter um bom aquecimento solar durante o dia, recomenda-se que a edificação tenha superfícies envidraçadas orientadas para o sol nas paredes e coberturas. E nas fachadas com menor taxa de insolação deve se utilizar pequenas aberturas nas fachadas que não recebem insolação, para evitar perdas de calor (LAMBERTS, 2016) (Figura 103).

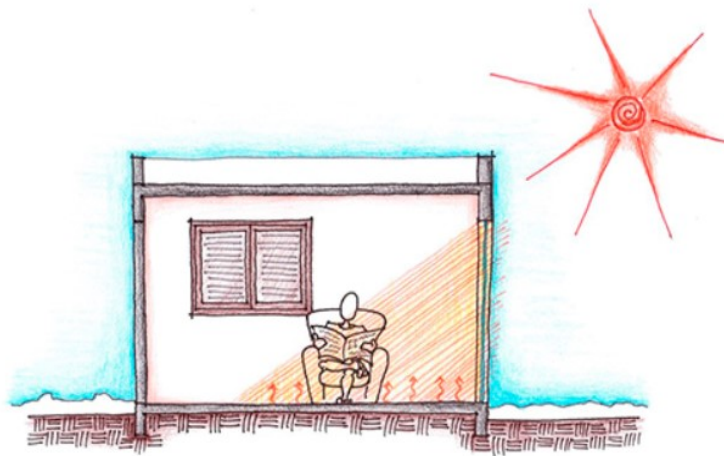


Figura 103 - Sistemas captadores de energia direta. Fonte: (PROJETEEE, 2020).

A inércia térmica para resfriamento é uma também estratégia usual para climas quentes e secos, onde a temperatura atinge valores muito altos durante o dia e extremamente baixos durante a noite. Nesses casos, as edificações devem ter componentes construtivos com elevadas capacidades térmicas gerando o atraso da onda de calor, fazendo com que esse calor incida no ambiente interno apenas no período da noite, quando existe a necessidade de aquecimento (LAMBERTS, 2016) (Figura 104).

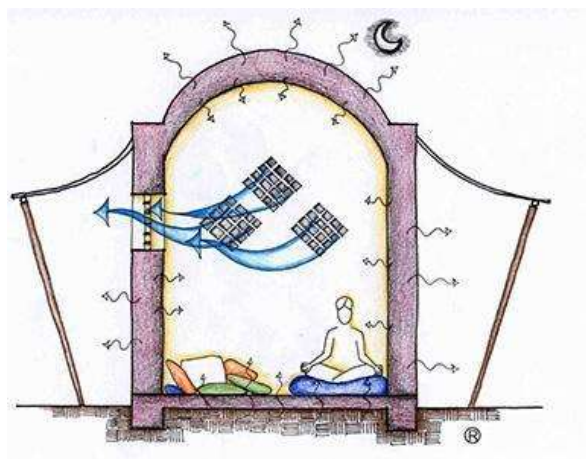


Figura 104 - Sistemas de inércia. Fonte: (PROJETEEE, 2020).

Como visto no subcapítulo anterior “2.4.2. Desempenho higrotérmico do adobe”, as produções científicas sobre o comportamento do adobe em climas brasileiros são escassas. A partir das recomendações apresentadas o capítulo “2.5. Estratégias bioclimáticas de apoio ao projeto de arquitetura” foram levantadas possíveis contribuições da alvenaria de adobe em termos de tipo e cores de envoltória, considerando que as variáveis implantação e aberturas não são influenciadas pelo material:

- Segundo Rempel & Rempel (2016), a alvenaria de adobe com espessuras acima de 30cm tende a contribuir para inércia em climas temperados e climas áridos com elevadas amplitudes térmicas.
- Para climas tropicais não há estudos específicos, porém, recomenda-se o uso de paredes leves e esbeltas com baixa ou moderada capacidade térmica, de modo a evitar a alta concentração de umidade, como apontado pelo NBR 15522 (ABNT, 2005).
- Em termos de cores, é recomendado o uso de cores claras para os climas tropicais e semiáridos de modo a superfície da envoltória atingir baixas absorções.
- No caso de climas temperados, o uso de cores escuras, com elevadas absorções, pode ser feito com o uso de reboco de terra aparente e tinta de terra.

6. SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE

No Estado da Arte, levantou-se questões históricas de como a construção em terra vindo sendo utilizada no Brasil para habitação social, seja em construções tradicionais ou contemporâneas. Também foram analisados, de uma forma mais profunda, os aspectos formais e construtivos da alvenaria de adobe. A escolha desta tecnologia se deu pelo fato do adobe ser a única tecnologia tradicional em terra normatizada, além de ser uma técnica tradicional presente nas comunidades

tradicionais rurais no nordeste brasileiro. Assim como realizou uma revisão sobre as estratégias bioclimáticas para as habitações econômicas no Brasil.

Desta análise conclui-se que a construção em terra no Brasil:

- Nasce a partir da fusão de tecnologias vernáculas dos povos indígenas com as técnicas construtivas trazidas pelos europeus e africanos durante o período colonial. Essas tecnologias permanecem até hoje em regiões rurais de difícil acesso a produtos industriais na região Nordeste, principalmente no Estado do Ceará. As técnicas construtivas que permanecem são o adobe e o pau-a-pique. Desde a década de 1960, essa tecnologia tem sido revisitada por arquitetos para produção de habitações sociais até hoje.
- Na segunda década do mesmo séc., após a implantação do PMCMV, a construção em terra não foi adotada para a produção de moradia social. Este programa habitacional só permitia o uso de tecnologias normatizadas, e a única técnica em terra normatizada, o adobe, apenas foi regulamentada em 2020.
- Em diversos países há estudos profundos e normas técnicas voltados para os requisitos estruturais da construção em adobe, principalmente vinculados à seleção dos solos ou resistência mecânica dos adobe, que representam 51,20% dos trabalhos coletados. Porém, no requisito térmico, a quantidade de trabalhos encontrados representa 19% dos trabalhos.

Quanto às construções em adobe e suas condicionantes arquitetônicas, percebe-se que:

- As normas brasileiras e internacionais que dão ênfase nos aspectos da seleção dos solos, como granulometria e limites de consistência do solo, e nos aspectos de resistência mecânica dos blocos e dados paredes, que devem ser averiguados em laboratório. Os tipos solos recomendados de uma forma geral devem apresentar um moderado percentual de areia, acima de 60% e um baixo percentual de silte e argila, até 25%. Enquanto ao desempenho estrutural aponta-se para valores acima de 1,5Mpa.
- Nos aspectos arquitetônicos compreende-se que são tecnologias que permitem edificar construções com a alvenaria estrutural de até 11 andares. Porém, em Portugal e no Brasil, os parâmetros normativos se restringem a 2 pavimentos. E nos quesitos dos vãos as paredes suportam pequenos vãos de 2,5 a 4m.
- No quesito de durabilidade é unânime entre os pesquisadores as recomendações de evitar contato das paredes com a água líquida, utilizando-se proteções no topo e base das paredes, como beirais e baldrames de pedra. Outras recomendações dizem respeito às

argamassas de reboco e assentamento, que devem ser compostas por materiais similares ao adobe, como terra ou cal.

No quesito desempenho térmico dos edifícios em adobe:

- As normas brasileiras e internacionais de desempenho térmico apontam como principais parâmetros para análise do desempenho e conforto térmico dos edifícios as seguintes propriedades térmicas: transmitância, capacidade térmica e envoltória.
- Os poucos estudos desta área científica são produzidos majoritariamente em Israel, México, Estados Unidos, Itália e Brasil, países onde o adobe se apresenta como um bom moderador de temperatura para um clima de alta amplitude térmica.
- As pesquisas ainda discorrem sobre a forte influência da cobertura das habitações térreas em adobe sobre variação das temperaturas internas, assim como a influência das paredes internas e espessuras das paredes.
- No Brasil, o trabalho de Francisco (2011) foi o único trabalho comparativo de desempenho térmico das construções em adobe e alvenaria cerâmica, destinado a climas subtropicais úmidos para cidade de Serra Azul, especificamente zona bioclimática 6.

A partir das questões apresentadas, constatou-se que a construção em terra ainda permanece viva em zonas rurais de alguns estados do nordeste brasileiro, como Ceará e Piauí, e tem sido utilizada em obras em obras de habitação econômica por arquitetos e engenheiros há pelo menos 60 anos. Deste modo, entende-se o potencial para o seu na produção de habitação econômica no Brasil. Dentre as técnicas construtivas mais utilizadas destacam-se o pau a pique, adobe e terra ensacada. O adobe ganha destaque na atualidade por ser normatizado, o que facilita a sua inserção em programas de financiamento habitacional.

Na sua imensa extensão territorial do Brasil, o clima que prevalece é o clima tropical, subdivido em Equatorial úmido, tropical de monção com chuvas no verão, tropical de savana com estação seca de inverno, concentrado na região norte e centro oeste do estado. Os climas áridos ou semi-árido se concentram no interior no nordeste brasileiro, afastado do litoral e tem baixa extensão territorial. No sul do país, os climas são frios e temperados: subtropical úmido, temperado úmido com verão quente, subtropical úmido, temperado úmido com verão temperado e este representam baixa extensão territorial. A partir destes climas foram desenvolvidas as estratégias bioclimáticas distribuídas em três categorias implantação, aberturas, envoltória e absorvência das envoltórias:

- No quesito **implantação**, recomenda-se plantas compactas para climas temperados, áridos e semiáridos e longitudinais para climas tropicais com fachadas extensas para captação de ventilação.

- No caso das **aberturas** as mesmas devem ser sempre sombreadas independentemente do tipo do clima. A ventilação de ser constante nos climas tropicais, no caso de climas temperados, áridos ou semiáridos as mesmas devem ser seletivas, evitando o excesso de frio ou calor.
- Quanto ao tipo de **envoltórias**, recomenda-se que em climas temperados, áridos e semiáridos deve ser do tipo pesadas de modo gerar uma boa inércia térmica.
- Quanto a absorvência das envoltórias, é sugerido o uso de cores claras com baixa absorvência para climas tropicais, áridos e semiáridos e cores escuras para climas temperados.

Como são escassas as produções científicas sobre o comportamento do adobe em climas brasileiros, aqui são apresentadas as possíveis contribuições da alvenaria de adobe para a eficácia do sistema construtivo em cada tipo de clima:

- Para as regiões temperadas, semiáridas e áridas recomenda-se uma elevada inércia térmica, utilizando paredes espessas, acima de 30cm;
- No caso de climas tropicais é sugerido o uso de paredes esbeltas de modo evitar alta concentração de humidade e consequente formação de fungos;
- Em climas tropicais e áridos aconselha-se o uso de cores claras para atingir baixa absorvência térmica no. As paredes escuras com elevadas absorvências, podem ser conseguidas com reboco de terra aparente.
- Para potencializar a eficácia da solução, devem-se utilizar coberturas leves para climas tropicais e pesadas para climas temperados, áridos e semiáridos.

Há uma grande escassez de estudos no quesito desempenho térmico para construções em adobe, se comparados às pesquisas ligadas ao desempenho estrutural. No caso do Brasil, catalogou-se um único estudo sobre a cidade Serra Azul, no estado de São Paulo, que apresenta um clima subtropical úmido na zona bioclimática 6. No caso do estado do Ceará, onde ainda há produção de habitações em adobe de forma tradicional, não se verifica nenhum estudo. Os climas que atuam no Estado são do tipo semiárido e tropical úmido, enquadrados nas zonas 5, 7 e 8. Assim, esta pesquisa procura preencher essa lacuna, desenvolvendo e validando diretrizes bioclimáticas para habitações econômicas em adobe no estado do Ceará.

Com as informações levantadas no Estado da Arte compreende-se que é viável construir em adobe no Ceará, pois esta tecnologia ainda faz parte de uma cultura construtiva local. Porém, na literatura, não se encontrou parâmetros térmicos para os climas cearenses ou para construções em

adobe. Devido à escassez de informações específicas na literatura sobre conforto térmico para edificações em adobe no Ceará. Deste modo, propõem-se:

- Avaliar a qualidade e as limitações das soluções construtivas em adobe no Ceará realizadas a partir dos parâmetros construtivos presentes nas normas internacionais e brasileiras e na literatura,
- Construir modelos com variações de suas propriedades térmicas baseadas na literatura internacional sobre o adobe, como calor específico, condutibilidade térmica, densidade e absorvância e suas limitações construtivas, como espessuras de paredes, dimensões dos vãos e estanqueidade da alvenaria;
- Avaliar o conforto térmico a partir dos parâmetros e recomendações da NBR 15575 e 15520 para as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 e recomendações da literatura, tendo como base a variação da transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância dos componentes da envoltória: paredes e coberturas.

CAPÍTULO 3

CASO DE ESTUDO

Para dar resposta ao déficit habitacional no Brasil implementou-se o programa Minha Casa Minha Vida no ano de 2009, com o objetivo de alojar o maior número de famílias e impulsionar a economia da construção e imobiliária. No entanto, os projetos de arquitetura dos empreendimentos realizados não tiveram nem conta o clima de cada região nem as tradições culturais e construtivas de cada local. Embora o Brasil seja conhecido pela sua enorme diversidade, em todos os empreendimentos é adotado o mesmo projeto desde o urbano, arquitetônico até ao construtivo. Consequentemente, o resultado tem-se revelado desastroso em particular a nível higrotérmico. As casas têm um mau desempenho construtivo, são regularmente intervencionadas pelos proprietários para se adaptarem às suas necessidades acarretando custos de manutenção excessivos e não previstos e têm vindo a descaracterizar a arquitetura das várias regiões onde se inserem.

No entanto, não seria difícil em algumas situações recorrer às tradições construtivas locais que já atestaram ter um desempenho higrotérmico muito superior ao sistema construtivo escolhido, em particular o adobe. Para que esta solução se possível é necessário informar os projetistas, em particular os arquitetos, sobre a viabilidade desta solução comparativamente com a usada hoje em dia neste programa. Para isso, propõe-se nesta tese, reunir um conjunto de estratégias que apoiem esta opção arquitetônica e construtiva, a construção de habitação econômica do PMCMV em adobe. Assim, neste caso de estudo, depois da contextualização deste programa e da análise do zonamento climático do Brasil faz-se a caracterização das construções populares em adobe no Ceará. Feita esta contextualização desenvolve-se um modelo da casa tipo PMCMV rural para se processar uma modelação térmica e avaliar as diferentes estratégias apontadas pelas recomendações bioclimáticas. Com os resultados obtidos, estabelecem-se as propostas de melhoria decorrentes das recomendações bioclimáticas para o Brasil.

A contextualização trata do déficit habitacional no Estado do Ceará associado a política habitacional do programa PMCMV. Na sequência é apresentado um levantamento da literatura sobre as construções de adobe no Ceará, em termos de soluções construtivas e viabilidade, como tipos de solos disponíveis e tradição construtiva. Depois detalha-se o zoneamento bioclimático do

Estado, apresentando as recomendações bioclimáticas para cada zona. Com esta informação são modelados e caracterizados os dois modelos MCMV apresentados para fazer uma análise térmica comparativa entre dois tipos de alvenaria: tijolo cerâmico em adobe. As análises realizam-se nas plataformas Energy Plus e Open Studio, considerando o mesmo modelo arquitetônico do PMCMV. Por fim, para otimizar o modelo PMCMV em adobe, introduzem-se no modelo as recomendações bioclimáticas validando os parâmetros das propriedades térmicas da envoltória: transmitância, capacidade térmica e absorvância, como recomenda a NBR 15575. De modo a validar estes parâmetros, optou-se por realizar variações de cores e espessuras para as paredes e nas coberturas variam-se as cores e forros, sempre considerando as soluções construtivas de baixo custo usuais no Estado Ceará.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA DA HABITAÇÃO NO BRASIL

O déficit habitacional do Ceará, segundo dados da Fundação João Pinheiro (2018), apresenta um total de 302.623 unidades, sendo na zona urbana de 74,24% e na rural 25,76%, distribuído nas seguintes categorias: habitações precárias, coabitação familiar, ônus excessivo com aluguel de domicílios urbanos e adensamento excessivo de domicílios alugados. Em paralelo ao déficit, existem 130.512 domicílios vagos em condições de serem ocupados, sendo 224.740 na zona urbana e 77.883 na zona rural (FJP, 2018).

O déficit habitacional se expressa a partir dos seguintes indicadores: municípios com maior número de domicílios sem banheiro; alto déficit habitacional relativo; menor taxa de urbanização e grande concentração do déficit habitacional no meio rural, associado a domicílios precários e inadequação fundiária; pouca capacidade para enfrentamento do déficit em função do baixo estoque de riqueza (FJP, ALBUQUERQUE, and MÁXIMO 2013).

Na zona urbana, a categoria que apresenta maior impacto é o déficit por ônus excessivo com aluguel de domicílios, representando o total de 46,72%. Esta categoria agrupa famílias que gastam mais do que 40% da renda familiar com aluguel. Na zona rural, a categoria que tem maior representatividade são as habitações precárias, 19,71%. As habitações precárias são aqueles imóveis com paredes externas feitas em pau a pique sem reboco, papelão e outros materiais inadequados. Também são considerados precários os imóveis sem banheiro. A coabitação familiar, que representa 18%, é compreendida quando mais de uma família habita a mesma casa por falta de recursos financeiros. Já o adensamento excessivo de domicílios alugados representa 4,63% (FJP, 2018) (Figura 105).

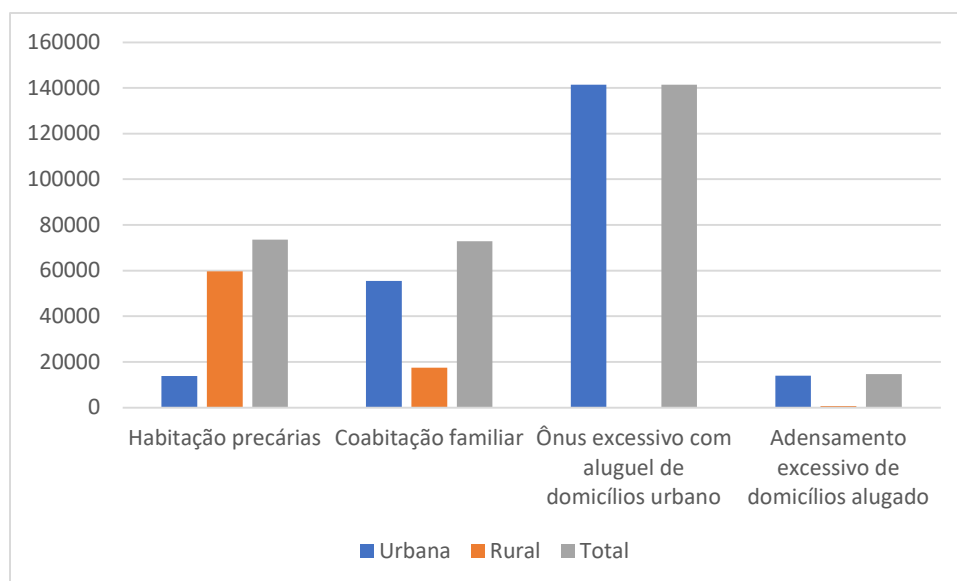


Figura 105 - O déficit habitacional rural apresenta como maior problemática as habitações precárias. Fonte: (FJP 2018).

O Estado do Ceará, segundo as classificações do Plano Nacional de Habitação (PLAHAB), apresenta municípios nas seguintes tipologias de déficit habitacional: C, E, H, J e K:

- A tipologia C, é composta por municípios com espaços urbanos aglomerados e capitais prósperas do Norte e Nordeste do Brasil. No Ceará, os municípios que compõem esta tipologia pertencem à região metropolitana de Fortaleza e apresentam uma grande densidade populacional, concentrando 56% dos domicílios e representando 29% do déficit habitacional do Estado. Contudo, o município de Fortaleza, sozinho, comporta 19% do déficit do Estado (BRASIL, ALBUQUERQUE, and MÁXIMO 2013).
- A E, representa apenas 2% dos municípios cearenses, são localidades com baixo estoque de riqueza, porém com grande importância regional, pois são cidades polo em regiões menos urbanizadas, situadas em microrregiões de menor dinamismo. Apresentam elevado grau de precariedade e pobreza, o que se reflete no alto déficit habitacional relativo, chegando a 23% dos domicílios. Em função das condições de pobreza, esse programa apresenta menor condição para enfrentamento dos problemas habitacionais e urbanos. São também os municípios que apresentam déficit habitacional rural mais elevado no conjunto dos municípios de mais de 100 mil habitantes.
- Por fim 77% das cidades são municípios de pequeno porte, com menos de 100 mil habitantes, enquadrados nas tipologias H, J e K. São cidades que apresentam taxas de desigualdade e pobreza, baixo dinamismo econômico e uma população predominantemente rural (BRASIL, ALBUQUERQUE, and MÁXIMO 2013).

Deste modo, a maioria dos municípios cearenses são de pequeno porte, com baixa densidade populacional, fraco dinamismo econômico e uma população predominantemente rural, com elevado déficit habitacional rural. As poucas cidades que apresentam um bom dinamismo econômico, concentram a maior parte da população do estado e com elevado déficit de habitação urbana. Como forma de reduzir esse déficit, a política habitacional rural do Ceará tem se dividido em duas vertentes:

- construindo novas habitações, através de programas de reforma agrária, e
- substituindo de casas de pau a pique (consideradas habitações precárias) por casas de alvenaria cerâmica.

Esses programas são financiados pelo Governo Federal, em parceria com os governos estaduais e municipais, que contribuem com doações de terrenos para construção das habitações, através do programa MCV (CARVALHO, PAULA, and PEREIRA 2017).

2. PROGRAMA MINHA CASA E MINHA VIDA

O PMCMV surgiu em março de 2009, a partir da Lei nº 11.977, de 7 de julho de 2009, para a execução de uma série de ações com o objetivo da diminuição do déficit habitacional, urbano e rural, subsidiando a população de baixa renda para aquisição de habitação. A sua atuação está direcionada para a produção, aquisição ou requalificação de moradias e age diretamente nos financiamentos habitacionais, subdividindo a população em faixas de renda (A. W. B. de CARVALHO, PAULA, and PEREIRA, 2017). O público-alvo são agricultores familiares, comunidades tradicionais e trabalhadores rurais, incluindo ribeirinhos, quilombolas, extrativistas, pescadores tradicionais e indígenas (CARVALHO, PAULA and PEREIRA, 2017).

Dentro do PMCMV zona rural, o Plano Nacional de Habitação Rural (PNHR) propõe-se a auxiliar famílias com renda anual de até R\$ 78.000,00 na construção ou reforma de suas habitações. No Ceará, desde a década de 1980, já foram construídos 457 assentamentos rurais, dos quais 128 produzidos pelo programa PMCMV Rural (INCRA, 2020). As instituições públicas responsáveis pela sua produção são o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), órgão federal, e Instituto do Desenvolvimento Agrário do Ceará (IDACE), órgão estadual, que para além das habitações, financia infraestruturas para as comunidades como cisternas, insumos agrícolas e habitações. Dentre as habitações produzidas pelo PMCMV, há duas tipologias de habitação 2 ou 3 quartos respectivamente. Ambas têm os mesmos padrões de acabamento: piso com revestimento cerâmico; paredes de alvenaria de tijolo cerâmico com reboco de argamassa cimentícia e pintura a base de cal e nas áreas molhadas utiliza-se revestimento cerâmico até

1,50m. As coberturas são de telha cerâmica sem forro. A tipologia 1, com 2 quartos e área de 39,82m², tem o custo de 31.500,00R\$, considerando somente os materiais de construção. A tipologia 2 tem 3 quartos e uma área de 65m² com um custo de 34.600,00R\$ (Figura 106 a Figura 109).

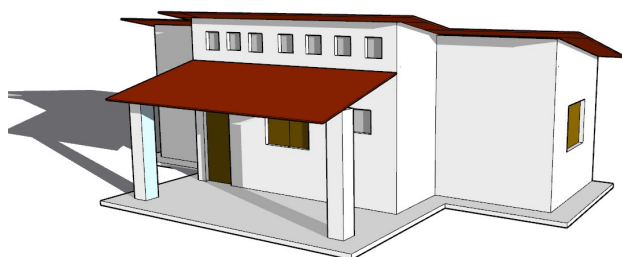


Figura 106 - Tipologia 1 - 02 cômodos

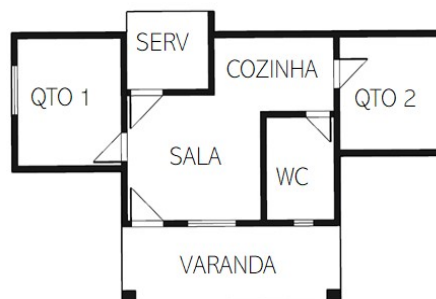


Figura 107 - Tipologia 2 - 03 cômodos

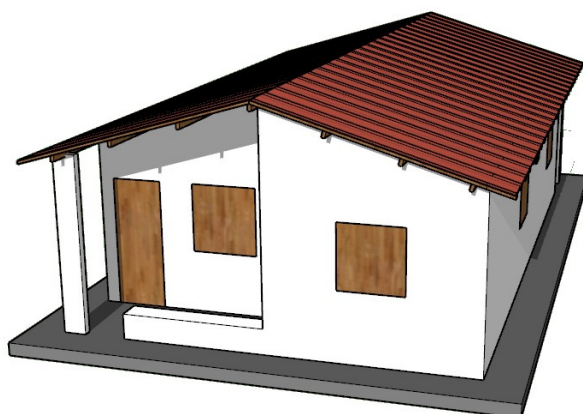


Figura 108 - Planta tipologia 1 – Programa Minha Casa e Minha Vida Rural Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).

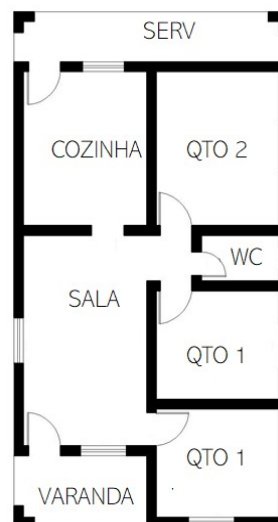


Figura 109 - Planta tipologia 2 – Programa Minha Casa e Minha Vida Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).

3. CONSTRUÇÕES DE ADOBE NO CEARÁ

No ano de 2010, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) computou a existência de 2.365.114 unidades habitacionais no Ceará. Esse estudo, aonde foram apenas as tipologias construtivas das paredes, identificou casas de pau a pique e alvenaria tijolo cerâmico maciço, tijolo comum, adobe, pau a pique, madeira e palha. O levantamento realizado, distinguiu apenas o fato de serem revestidas ou não (IBGE, 2010).

Os Estados do Ceará e do Maranhão apresentam a maior quantidade de **casas de pau a pique** do país (IBGE, 2010). Somam um total de 93.852 unidades (na maioria em estado precário) das quais 58.045 revestidas e 35.807 não revestidas. As casas com paredes de madeira somam um total 2404 unidades, sendo 1314 de madeira aparelhada e 1090 madeira aproveitada. Há um número reduzido de 361 unidades de casas com paredes de palha (Figura 110).

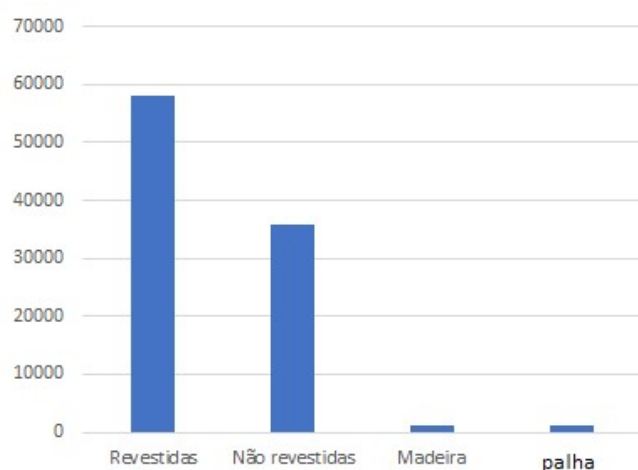


Figura 110 – Tipologias de paredes de pau a pique, madeira e palha para habitações no Ceará.

As casas de pau a pique no Ceará, em sua maioria, se situam na zona rural do Estado em fazendas (como é o caso do município do Juazeiro do Norte). São habitadas por pequenos agricultores a residir nas fazendas, sobrevivem da agricultura familiar e subsídios do governo. Devido às baixas condições econômicas, os moradores produzem habitações sem planejamento, sem responsável técnico e em regime de autoconstrução. Muitas vezes, as casas não têm qualidade técnica na sua execução: as paredes não são rebocadas (Figura 111) não têm banheiro ou esgotamento sanitário (Figura 112) (MACÊDO et al. 2012).



Figura 111 – habitação precária no município de Barro, tipo casa de pau a pique sem reboco.



Figura 112 – habitação precária no município de Ubajara, tipo casa com banheiro improvisado com parede de palha.

As **casas em alvenaria**, onde se incluem as habitações em adobe, somam o maior número de 2.264.364 unidades, 1.991.389 revestidas e 272.975 não revestidas. As obras em adobe tradicional se concentram na região norte e nordeste do estado na zona bioclimática 5 (cidades de Alcântaras, Aracati, Coreaú, Crateús, Eusébio, Granja, Guaramiranga, Ipueiras, Jijoca, Marco, Moraújo, Mulungu, Uruburetama, Ibiapina, São Benedito, Tianguá e Ubajara) regiões úmidas e de maior amplitude térmica. (PALITOT, 2007), (CARVALHO 2012), (AMARAL, INGRID, and COSTA 2019) e (ALCÂNTARA et al. 2018) (Figura 113).

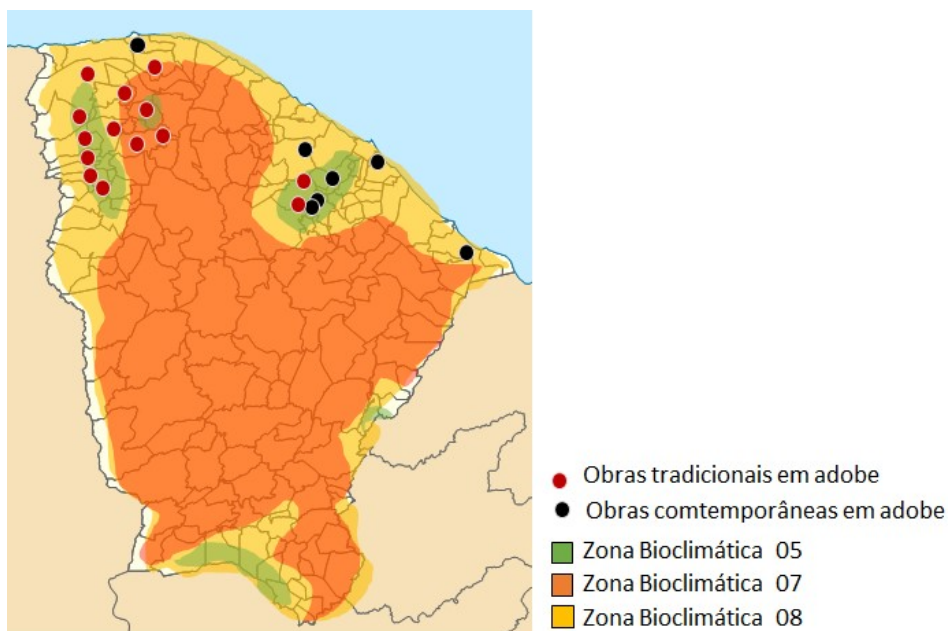


Figura 113 – Mapa de adobe no Ceará. FONTE: CARVALHO (201).

As construções tradicionais em adobe apresentam soluções construtivas com pequenas variações. A título de exemplo as habitações tradicionais catalogadas no trabalho de (R. M. de CARVALHO 2012) apresentam coberturas em telha cerâmica sem forro com estrutura de madeira beneficiada ou roliça nativa. Já o revestimento piso varia entre cimento queimado e cerâmica, principalmente nas áreas molhadas de banheiro e cozinha.

As **fundações** são simples do tipo baldrame, percorrendo a base das paredes. Os tipos de materiais utilizados na fundação são pedras assentadas em argamassas de terra ou cimento (de CARVALHO, 2012) (ALCÂNTARA et al., 2018) ou tijolos cerâmicos vazados assentados com argamassa cimentícia (CARVALHO, 2012) (Figura 114 e Figura 115).



Figura 114 - Fundação Baldrame em pedra com argamassa cimentícia. Fonte: (CARVALHO, 2012)



Figura 115 - Fundação Baldrame em tijolo cerâmico vazado com argamassa de terra. Fonte: (CARVALHO, 2012)

A **estrutura** das casas é feita com alvenaria autoportante de adobe simples ou dobrado, que suporta a estrutura da coberta. Em todas as habitações levantadas por Carvalho (2012) e Alcântara et al (2018) a estrutura da cobertura é em madeira por vezes beneficiadas ou roliças, retiradas da vegetação do entorno e revestida com telhas cerâmicas sem forro (Figura 116 e Figura 117).



Figura 116 - Cobertura com telhado cerâmico e madeira de desgalhe, habitação tradicional em Viçosa do Ceará. Fonte: (CARVALHO, 2012).



Figura 117 - Cobertura com telhado cerâmico e madeira de serrada, habitação tradicional em Ibiapina. Fonte: (ALCÂNTARA et al., 2018).

As soluções para vergas são peças de madeira em concreto armado ou tijolo cerâmico com argamassa cimentícia. Nesta região do Brasil não se encontram casas de adobe com estruturas de vãos em arco, tecnologia comum nas casas portuguesas ou em outras países da América Latina (CARVALHO, 2012) e (ALCÂNTARA, 2019) e (Figura 118 e Figura 119).



Figura 118 - Verga em madeira de uma habitação de adobe tradicional. Fonte: (CARVALHO, 2012).

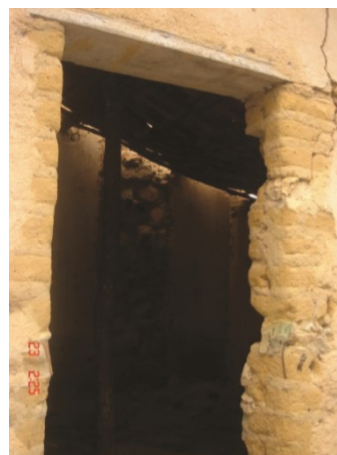


Figura 119 - Verga em concreto armado de uma habitação de adobe tradicional. Fonte: (CARVALHO, 2012).

Os **blocos** são feitos de terra e água sem aditivos. Dependendo da localidade onde são produzidos, apresentam dimensões semelhantes com as variações seguintes: a espessura está entre

os 14 e os 22cm, a altura entre os 7cm a 10cm a largura entre os 27 a 40cm. No mesmo trabalho foi feito o levantamento das variações dimensionais em cada município, resumidas na Tabela 23.

Tabela 23 - Variação dimensional dos blocos de adobe

ID	Dimensões	Município
1*	22x7x40	Tianguá, Viçosa, Coreaú, Moraújo
02*	20x7x40	Granja, Marcos
03*	19x7,5x30	Ipueiras
04*	14x7x28	Uruburetama
05*	14x7x27	Alcântaras
06*	7x20x27	Alcântaras
07**	17x10x32	Ibiapina
08**	20x10x27	

Fonte: (CARVALHO, 2012) e (ALCÂNTARA et al., 2018).

A **produção dos blocos** é feita de forma artesanal, utilizando-se a terra e água e formas de madeira. As formas podem servir para moldagem de um a dois adobes como se observa nas Figura 120 e Figura 121. (CARVALHO, 2012) e (ALCÂNTARA et al., 2018).



Figura 120- Adobes sem aditivos em Ibiapina.

Fonte: (ALCÂNTARA et al., 2018).



Figura 121- Adobes sem aditivos em Viçosa

do Ceará. Fonte: (CARVALHO, 2012).

Dentro do trabalho de levantamento das obras tradicionais em adobe Carvalho (2012), Amaral (2019) e Alcântara (2018), constatam que o Ceará tem um **solo** propício para produção de adobe. A terra desta região atende aos parâmetros definidos pela norma de adobe, NBR 16814 (ABNT,

2020), como granulometria e resistência mecânica. No levantamento realizado por Carvalho (2012) observou-se que as soluções construtivas das habitações tradicionais apresentam poucas variáveis seja para as fundações, paredes ou coberturas, variando apenas o tamanho dos blocos e os tipos de revestimentos, como cal, cimento e terra.

Em um levantamento realizado por diversos autores cearenses como Amaral et al (2019), Alcântara (2018), Ferreira et Silva (2009), Pinheiro (2009), Costa et al (2014) conclui-se que os solos puros analisados apresentam uma variação de resistência à compressão entre 1,02 e 2,5 Mpa, cujos valores inferiores estão abaixo do recomendado pela NBR 16814 (2019) para blocos de vedação 1,5 Mpa. Porém, mesmo que o solo natural não apresente um bom desempenho, pode ser otimizado com aditivos locais e dosagens corretas (ABNT 2020) aumentando a qualidade de solo para valores compreendidos entre 1,38 e 3,00 Mpa.

Quando se utilizou aditivos como esterco, fibras de coco e as cinzas de combustão de carvão mineral (CCCM), verificou-se que houve melhorias na resistência mecânica dos adobes com as seguintes conclusões:

- a quantidade ideal das fibras deverá estar entre 10% e 20%, acima deste valor pode-se reduzir bastante a resistência à compressão.
- a dosagem ideal das cinzas de combustão de carvão mineral (CMM), deve ser no máximo 5%, o que permitirá um aumento de 30% do valor da resistência mecânica no bloco de adobe. Acima deste valor o bloco começa a perder resistência.

A partir destes dados construiu-se uma tabela síntese, organizando as informações sobre resistência mecânica em alguns municípios do Ceará de modo a mostrar a qualidade dos solos para adobe (Tabela 24).

Tabela 24 – resistência mecânica adobe no Ceará

Município	Aditivo (%)	Resistência a compressão (Mpa)	Fonte
Ibiapina	0%	1,63	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Ibiapina	0%	1,43	(ALCÂNTARA et al. 2018)
Maranguape 01	0%	1,64	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Maranguape 01	25% de esterco	1,36	
Maranguape 02	0%	1,56	(FERREIRA and SILVA 2009)
Maranguape 02	10% fibra de coco	1,9	
Maranguape 02	20% fibra de coco	1,4	
Coreaú	0%	1,02	(R. PINHEIRO 2009)
Coreaú	10% fibra de coco	1,38	
Jijoca	0%	1,32	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Eusébio	0%	1,62	
Eusébio	25% de esterco	1,04	
	0%	2,5	
	5% cinza		
Fortaleza	volante*	3	(COSTA et al, 2014)
	10% cinza		
	volante*	2,7	

* 10% e 20% em relação ao volume do adobe

**5% em relação a densidade do adobe

Os **rebocos e revestimentos** são à base de cal (Figura 122), cimento, solo cimento (Figura 123) e terra. As paredes são revestidas com pintura nas áreas comuns e com ladrilhos cerâmicos nas áreas molhadas até 1,5m há também casas sem reboco, principalmente nas paredes internas. (CARVALHO, 2012).



Figura 122- Argamassa de solo cimento, casa tradicional em Ibiapina. Fonte: (ALCÂNTARA et al, 2018).



Figura 123- Argamassa de cal, casa tradicional em adobe. Fonte: (CARVALHO, 2012).

Em resumo, as soluções construtivas tradicionais, em sua maioria, são compatíveis com as recomendações da literatura. Há, no entanto, algumas exceções: as aberturas são realizadas, somente por vergas e nunca por arcos; há fundações em pedra com argamassa de terra, porém, o recomendado é cal ou cimento (Figura 124).

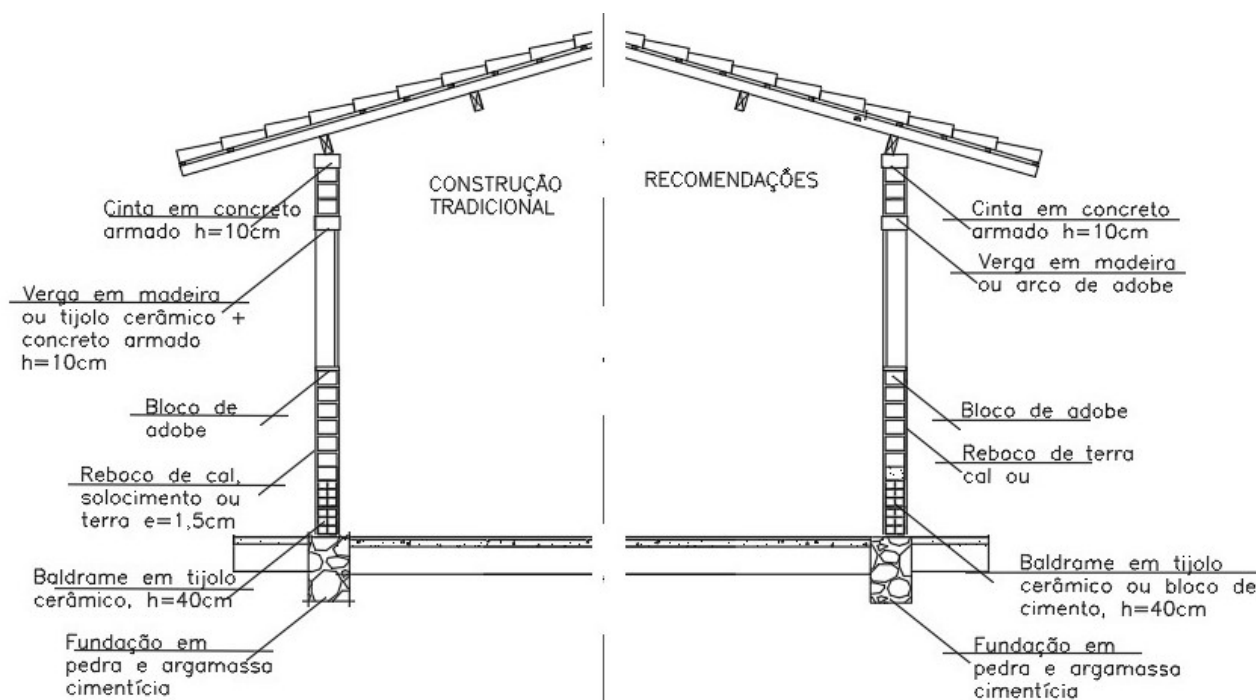


Figura 124- Soluções construtivas tradicionais em adobe no Ceará.

4. RECOMENDAÇÕES BIOCLIMÁTICAS PARA O CEARÁ

O Estado do Ceará apresenta uma área total 148.826 m^2 e é composto por 184 municípios e uma população de 8,843 milhões de pessoas. Está localizado no Nordeste do Brasil, entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio, mais especificamente entre a longitude 36° a 41° W e a latitude $29^\circ 30'$ a $7^\circ 30'S$, cujas variações da radiação solar se limitam pelos solstícios de verão e inverno, não havendo outras estações (Figura 125). Os tipos climáticos são quentes e úmidos ou quente e semiárido com baixas amplitudes térmicas. As variações climáticas decorrem da topografia e da proximidade com a zona litorânea (BRASIL, ALBUQUERQUE, and MÁXIMO 2013).



Figura 125 – Mapa de localização do Estado do Ceará, Brasil.

Nesta investigação utilizaram-se duas classificações climáticas para compreender os climas do Estado do Ceará: Koppen e Thornthwaite, além do zoneamento bioclimático da NBR 15220, que

apresenta recomendações de conforto térmico para as cidades brasileiras. Segundo a classificação Koppen, o Ceará se enquadra em três tipos climáticos:

- i) o clima tropical do tipo tropical com inverno seco (Aw), apresentando uma boa distribuição chuvosa e temperaturas acima de 18°C;
- ii) o conjunto de climas secos do tipo B, que apresenta longos períodos de estiagem, podendo durar 8 meses ou até mais de um ano, representado pelos climas desértico quente (Bsh) e
- iii) o semiárido quente (Bwh).

Por outro lado, na classificação de Thornthwaite há 4 classificações climáticas de acordo com a variação de umidade:

C1 – Subúmido,

C2 -Súbúmido chuvoso,

D – Semiárido

E – Árido, clima bastante seco com longos períodos de estiagem (MUNIZ et al, 2017).

As estratégias bioclimáticas da NBR 15220 dividem o Brasil em 8 zonas bioclimáticas compreendidas como regiões geográficas homogêneas quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano. No caso do Ceará, o estado apresenta 3 zonas bioclimáticas: 5, 7 e 8, sendo a zona 5 a de menor dimensão e a zona 7 a de maior (ABNT, 2013). As estratégias climáticas específicas para os municípios do Ceará são escassas ou nulas, desse modo, neste trabalho, são consideradas pesquisas realizadas em cidades enquadradas nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8. A classificação climática foi realizada a partir de 12 cidades do Ceará, pois do total de 184, estas são as únicas que apresentaram dados climáticos suficientes para a classificação (Figura 126).

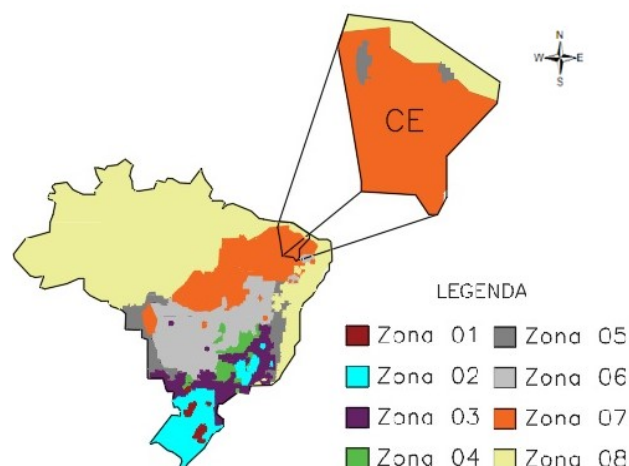


Figura 126 - Classificação bioclimática. Fonte: adaptado de (ABNT, 2013).

- A zona 5 é representada pela cidade de Guaramiranga com um clima peculiar de Tropical com inverno seco (Aw) e Subúmido Chuvoso (C1), clima esse encontrado nas poucas regiões do Estado do Ceará com altitudes acima de 600m. Para essa zona a NBR 15220 (2005) propõe estratégias construtivas do tipo CFI, como o uso de vedações internas pesadas para incrementar a inércia térmica de aquecimento noturno, a desumidificação e renovação do ar pelo uso da ventilação cruzada.
- A zona 7 representa 7 cidades: Barbalha, Campos Sales, Crateús, Iguatu, Morada Nova, Quixadá, Quixeramobim, Jaguaruana, Iguatu e Tauá. Algumas cidades são caracterizadas pelos climas Seco, Semiárido e Quente (BSH) combinado com árido (E) ou semiárido (D). Nas restantes o clima é Tropical com Inverno Seco (Aw) combinado com o clima semiárido (D). Para essa zona bioclimática, são sugeridas pela NBR 15220 (2005) estratégias do tipo DFJH, FIJK E FHIJK, com o uso da desumidificação e renovação do ar, resfriamento evaporativo, ventilação cruzada e em períodos de temperaturas mais extremas, o uso de resfriamento artificial.
- Por fim, a zona 8, dentro da amostragem, contempla somente a capital Fortaleza, que se enquadra no clima Aw Tropical com inverno (Aw) e sub-úmido seco (C1). Esses tipos climáticos representam uma pequena parcela do território nas regiões litorâneas e na parte inferior das serras. Para essa zona bioclimática são sugeridas pela NBR 15220 (2005) estratégias do tipo FIJ, como o uso da desumidificação e renovação do ar e ventilação cruzada (Tabela 25 e Figura 127).

Tabela 25 – Classificação climática e zona bioclimática no Ceará

Cidades	Koppen	Thornai	Zona	Estratégias
Barbalha	Aw	C1/D	7	DFHIJ
Campos Sales	BSh	D	7	D- Zona de conforto térmico a baixas umidades
Crateús	BSh	D	7	F – Desumidificação do ar/ renovação do ar H - Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento J - Ventilação cruzada
Iguatu	Aw	D	7	FIJK F – Desumidificação do ar/ renovação do ar IJ - Ventilação cruzada K - Resfriamento artificial,
Morada Nova	Aw	D	7	FHIJK
Quixadá	BSh/Aw	D/E	7	F – Desumidificação do ar/ renovação do ar H – Resfriamento evaporativo IJ - Ventilação cruzada
Quixeramobim	BSh	D/E	7	K - Resfriamento artificial, quando necessário
Fortaleza	Aw	C1	8	FIJ F – Desumidificação do ar/ renovação do ar IJ - Ventilação cruzada
Jaguaruana	Aw	D/E	7	FIJK
Iguatu	BSh	D	7	F – Desumidificação do ar/ renovação do ar IJ - Ventilação cruzada K - Resfriamento artificial, quando necessário
Guaramiranga	Aw	C2	5	CFI C - Vedações internas pesadas (inércia térmica) F – Desumidificação do ar/ renovação do ar I – Ventilação cruzada
Tauá	BSh	E	7	DFHIJ D- Zona de conforto térmico a baixas umidades F – Desumidificação do ar/ renovação do ar

HI – Resfriamento evaporativo

J - Ventilação cruzada

Fonte: adaptado de (ABNT 2013b)

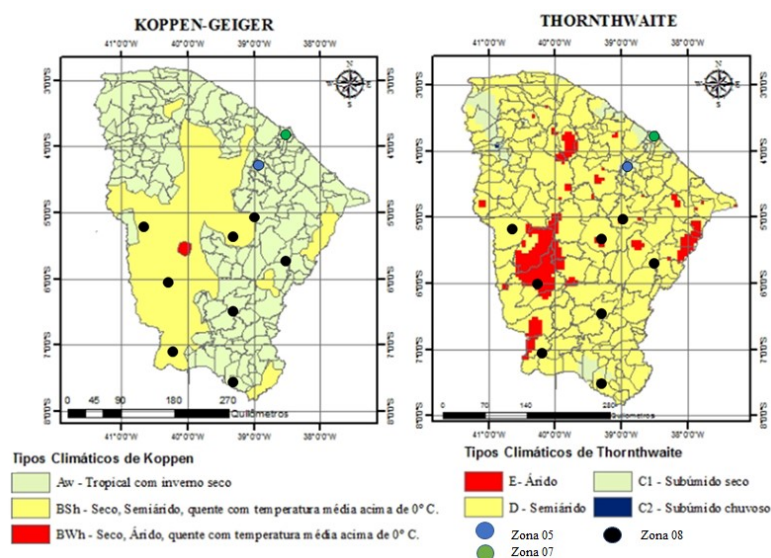


Figura 127 - Mapas de classificação climática de Thornthwaite e Köppen e Zoneamento Bioclimático para o estado do Ceará (MUNIZ et al, 2017).

A NBR 15575 aponta critérios de avaliação para cada zona bioclimática, como parâmetros para transmitância (U), capacidade térmica (CT) e absorptância (α) para envoltória e dimensões de esquadrias, que são calculados a partir das propriedades térmicas dos materiais como massa específica, condutibilidade térmica, calor específico e espessura. Assim, estabelecem-se níveis de desempenho avaliados pelo valor das temperaturas máximas de verão e mínimas de inverno, medidos in loco ou a partir de simulações térmicas em plataformas como Energy Plus ou similares (ABNT, 2013).

A partir das recomendações bioclimáticas da NBR 15220, NBR 15575 e de autores como (WESTPHAL, 2007) e (FERREIRA, SOUZA, and ASSIS, 2014), enquadraremos as recomendações das três zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 a partir de 3 categorias:

- Implantação, onde se apresentam recomendações sobre: orientação, planta de situação e espaçamento entre construções.
- Aberturas e renovação de ar: com recomendações sobre circulação do ar, dimensões das aberturas e posição das aberturas.
- Por fim, envoltórias e piso, onde são apresentados parâmetros com absorptância, transmitância e capacidade térmica para coberturas, paredes e piso.

Em termos de estratégias bioclimáticas, a NBR 15775 aponta recomendações específicas para as propriedades térmicas das envoltórias das edificações. As paredes e coberturas devem apresentar moderadas transmitâncias térmicas sem necessitar de isolamento térmico, de modo que atendam às absorvâncias menores que 0,6 ou 0,4 dependendo da zona bioclimática:

- Na zona 5, é sugerido o uso de coberturas com $U \leq 2,3 W/m^2K$, quando $\alpha \leq 0,6$ ou $U \leq 1,5 W/m^2K$, quando $\alpha > 0,6$.
- Enquanto para as zonas 7 e 8 são recomendadas absorvâncias com valores mais baixos para atender às mesmas transmitâncias sugerindo-se a ventilação do forro.

Assim, sugere-se o uso de coberturas com $U \leq 2,3 W/m^2K$, quando $\alpha \leq 0,4$ ou $U \leq 1,5 W/m^2K$, quando $\alpha > 0,4$. Em geral, para a capacidade térmica não há recomendações para nenhuma zona bioclimática (Tabela 26) (ABNT, 2013).

Tabela 26 – Parâmetros térmicos para cobertura

Propriedades	Unidades	Zona 5		Zona 7 e 8		
α	-	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	$\alpha \leq 0,6$
$U (W/m^2K)$	W/m^2K	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$ <i>FV</i>	$U \leq 1,5$ <i>FV</i>	$U \leq 3,7$
CT	KJ/m^2K	Sem recomendação	Sem recomendação	-	-	≥ 130

Fonte: (ABNT, 2013)

Quanto às paredes e elementos de vedação vertical, a NBR 15775 (ABNT, 2013) aponta recomendações similares para as zonas bioclimáticas 5 e 8, cujas paredes devem ter $U \leq 3,7 W/m^2K$, $\alpha \leq 0,6$ e $CT \geq 130 KJ/m^2K$ (Tabela 27).

Tabela 27– Parâmetros térmicos para as paredes

Propriedades	Unidades	Zona 5, 8 e 7
α	-	$\alpha \leq 0,6$
$U (W/m^2K)$	W/m^2K	$U \leq 3,7$
CT	KJ/m^2K	$CT \geq 130$

Fonte: (ABNT, 2013)

4.1. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

A zona bioclimática 5 é representada por cidades com clima tropical (Aw) e altitudes maiores que 600m, o que permite um clima com temperaturas mais amenas do que o restante do Estado do Ceará. Atinge no máximo 32°C e mínimas de 10°C no período noturno e média anual de 20,9°C. Quanto à precipitação pluviométrica, apresenta um regime de chuvas elevado, se concentrando no primeiro semestre do ano (IMMET, 2018). Essa zona apresenta três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), onde se apontam parâmetros que relacionam as temperaturas internas (Ti) e externas máximas (Te), conforme a Tabela 28 (ABNT, 2013).

Tabela 28– Critérios de avaliação de desempenho térmico para o verão

Nível de desempenho	Critério de desempenho
Mínimo (M)	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
Intermediário (I)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ} \text{ C})$
Superior (S)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ} \text{ C})$

Fonte: (ABNT, 2013)

Para o projeto de arquitetura a norma recomenda:

- Implantação das edificações compactas de modo evitar a perda de calor pelas paredes.
- A disposição das edificações deve ser espaçada para favorecer a penetração dos ventos (FERREIRA, SOUZA, and ASSIS 2014).
- Quanto aos parâmetros de aberturas e renovação de ar, aponta-se o uso da ventilação cruzada com aberturas de ar controláveis FERREIRA, SOUZA, and ASSIS 2014), permitindo a desumidificação do ar. A ventilação deve ser seletiva, isto é, utilizar somente quando o ar externo for mais quente que o interno, com dispositivos de controle com venezianas e brises móveis (Figura 128).
- Quanto às dimensões das aberturas, recomenda-se que sejam sombreadas e pequenas com área de $A \geq 7\%$ da área do piso do ambiente a ser ventilado (ABNT, 2013).

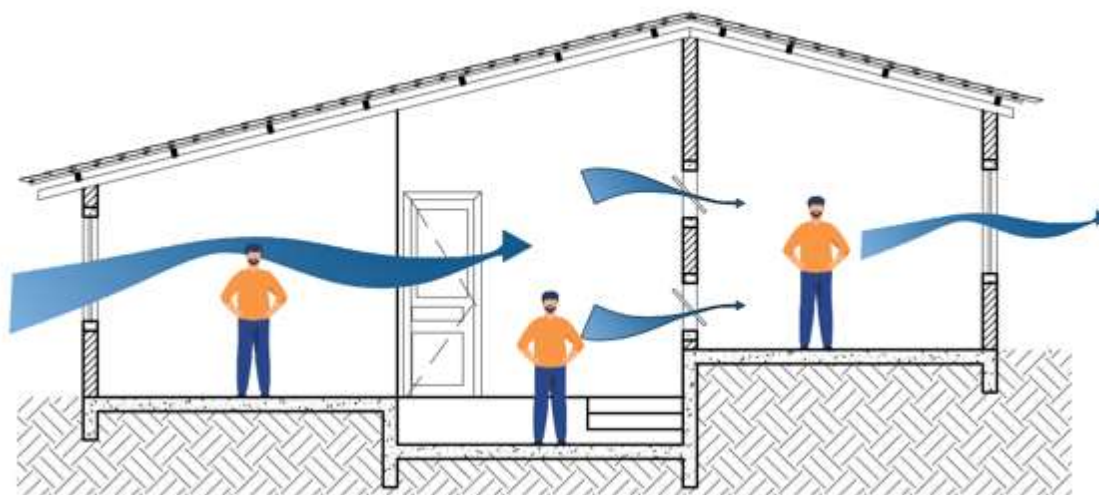


Figura 128– Sistema de ventilação cruzada com venezianas.

Os parâmetros propostos na definição da envoltória para aquecimento apostam a norma no uso de massa térmica. Assim, quando a absorvância das coberturas for $\alpha \leq 0,6$, recomenda-se o $U \leq 2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ou quando $\alpha > 0,6$, recomenda-se $U \leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Quanto à parede, recomenda-se valores de massa térmica para garantir aquecimento, com média ou baixa $a \leq 0,6$; paredes com transmitância e capacidade térmica moderada $U \leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT \geq 130 \text{ KJ/m}^2\text{K}$ (Tabela 29) (ABNT, 2013).

Tabela 29– Recomendações para envoltória Zona bioclimática 5.

Propriedades	Unidades	Coberturas		Paredes
α	-	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha a \leq 0,6$
$U \text{ (W/m}^2\text{K)}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 3,7$
CT	$\text{KJ/m}^2\text{K}$	Sem recomendação	Sem recomendação	≥ 130

Fonte: (ABNT, 2013)

Em síntese para edificações implantadas na zona bioclimática 5 recomenda-se o uso da ventilação seletiva somente no período diurno de modo a captar o calor e armazená-lo para o período noturno. As plantas e sua distribuição devem ser compactas de modo a evitar a perda de calor (Figura 129).

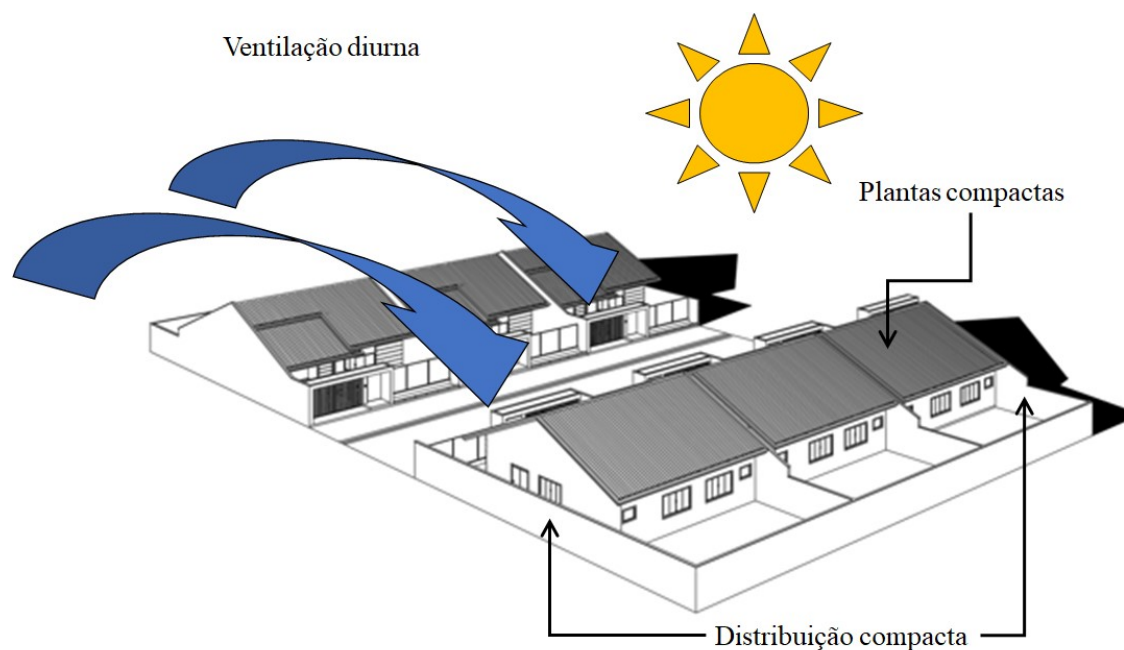


Figura 129 - Estratégias bioclimáticas para zona 5.

4.2. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

A zona bioclimática 7 apresenta critérios similares à zona bioclimática 5. Ambos os climas apresentam uma moderada amplitude térmica, porém as temperaturas máximas são mais elevadas na zona bioclimática 7. Esta zona agrupa regiões com clima semiárido quente (BSh), com temperaturas elevadas durante o dia e noites frias e um regime chuvoso de 8 a 12 meses de seca (IMEET). São considerados três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), onde se apontam parâmetros que relacionam as temperaturas internas (T_i) e externas máximas (T_e), conforme a Tabela 30 (ABNT, 2013).

Tabela 29 - Critérios de avaliação de desempenho térmico para o verão

Nível de desempenho	Critério de desempenho
Mínimo (M)	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
Intermediário (I)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^\circ \text{C})$
Superior (S)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^\circ \text{C})$

Fonte: (ABNT, 2013)

A zona 7 se distribui entre três estratégias bioclimáticas: DFHIJ, FHIJK e FIJK:

- O tipo DFHIJ, agrupando os municípios de Barbalha, Campos Sales Crateús e Tauá recomenda a desumidificação do ar através da renovação de ar, uso de massa térmica para refrigeração e uso de ventilação.
- Ao FHIJK, que agrupa os municípios de Modubim, Morada Nova, Quixadá e Quixeramobim, adiciona-se o uso da refrigeração artificial quando necessário, considerando que as estratégias passivas não forem viáveis para atingir o conforto térmico em períodos de elevadas temperaturas.
- Por fim para o tipo FIJK, representado pelo município de Iguatu, com recomendações similares ao tipo FHIJK, não se propõe o uso da massa térmica para refrigeração (ABNT, 2013) (Tabela 31).

Tabela 30 – Estratégias bioclimáticas cidades do Ceará pertencentes a zona 7.

Tipo	Cidade	Estratégia
DFHIJ	Barbalha, Campos Sales Crateús e Tauá	desumidificação do ar através da renovação de ar
		uso de massa térmica para refrigeração e uso de ventilação
		uso de ventilação
FHIJK	Modubim, Morada Nova, Quixadá e Quixeramobim	desumidificação do ar através da renovação de ar
		uso de massa térmica para refrigeração e uso de ventilação
		refrigeração artificial
		uso de ventilação
FIJK	Iguatu	massa térmica para refrigeração
		uso de ventilação
		refrigeração artificial

Ao sobrepor as estratégias bioclimáticas destinadas às cidades pertencentes à zona bioclimática 7, verifica-se que as estratégias DFHIJ se enquadram em sua maioria na classificação Seco semiárido, quente (Bsh) e semiárido (D). Por outro lado, as cidades com as estratégias de FHIJK

FIJK se enquadram em suas maiorias nos climas Aw e D, uma cidade em Bsh (Figura 130).

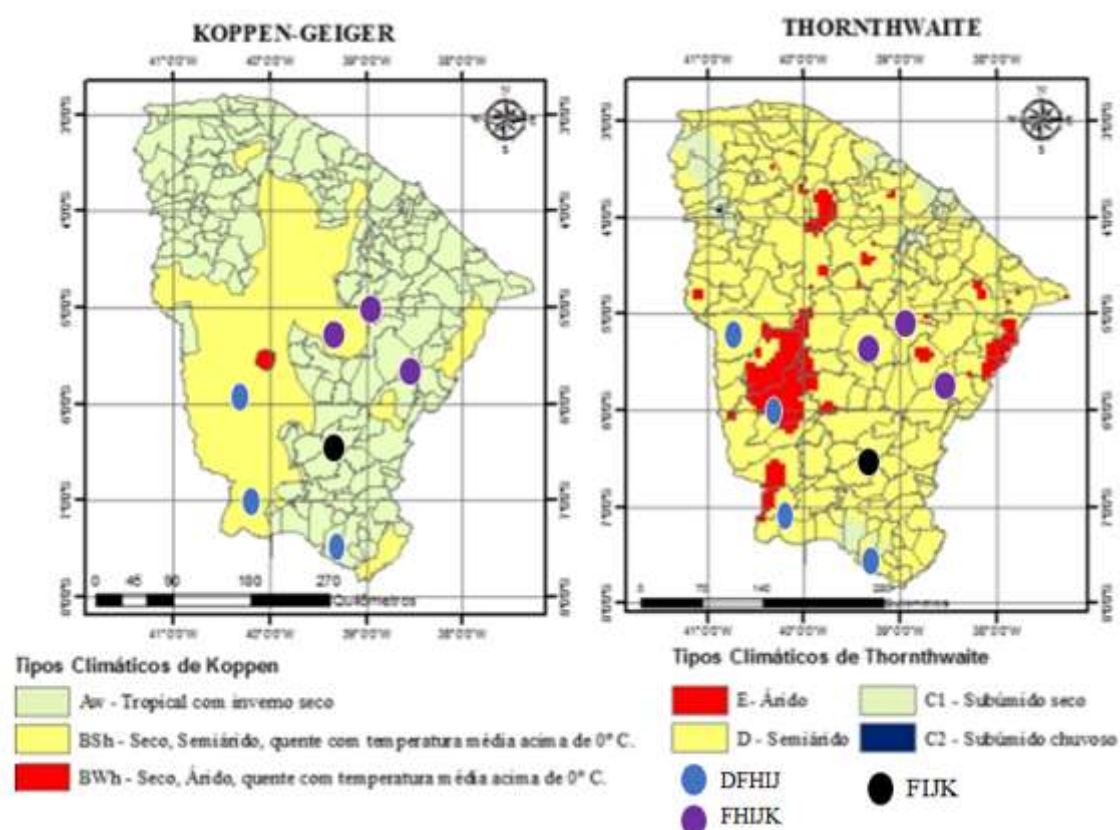


Figura 130 — Estratégias bioclimáticas da zona bioclimática 7 e classificação climática de Koppen e Thornthwaite (MUNIZ et al, 2017).

Quanto ao projeto de arquitetura, reuniram-se as seguintes indicações:

- Ferreira et al (2014) propõem recomendações complementares para esta zona, como construções com plantas compactas e pátios internos, e espaçamento reduzido entre elas, de modo a evitar a radiação solar direta (Figura 1) (FERREIRA, SOUZA, and ASSIS, 2014).
- Lima et Ribeiro (2009) apontam que, no caso de edifícios longitudinais, as fachadas Norte ou Sul deverão ser as mais extensas. Para as fachadas Leste-Oeste, sugere-se o uso de barreiras térmicas, evitando a radiação direta (LIMA and RIBEIRO, 2009).
- Quanto à Oeste ou Norte não se recomenda a colocação dos quartos (DOFLER and KRUGER 2016).
- Recursos hídricos e áreas verdes, como lagos, lagoas ou açude próximos à residência ou dentro do pátio interno, permitem o esfriamento evaporativo ou (MEDEIROS and ELALI 2011).

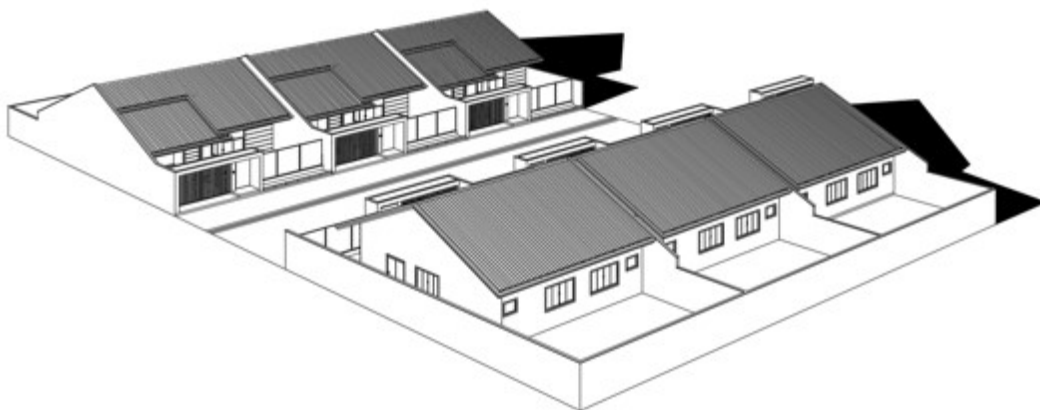


Figura 131 – Implantação plantas e espaçamento compacto entre elas.

Quanto aos parâmetros de aberturas e renovação de ar, recomenda-se que a ventilação seja seletiva e utilizada somente quando a temperatura do ar externo for mais fria que a interna:

- As aberturas, devem ser sombreadas e pequenas, com área de $A \geq 7\%$ da área do piso do ambiente a ser ventilado (ABNT 2013). Já Medeiros and Elali (2011) apontam para valores menores $A \geq 5\%$ da área do piso, devido ao vento seco (MEDEIROS and ELALI 2011).
- As trocas de ar que promovem a desumidificação podem ser feitas através do aumento do fluxo de ar através de pátios, chaminés e equipamentos mecânicos e resfriamento evaporativo (DACANAL et al. 2018).
- Borges recomenda o uso do pé direito alto sem forro na cobertura, de modo a gerar uma ventilação por efeito de chaminé, como eram utilizadas nas casas de fazendas antigas no nordeste brasileiro (Figura 132) (BORGES, 2015).
- Os mesmos autores, aconselham também o uso de bandeiras nas portas para saída do ar quente (MEDEIROS and ELALI, 2011).
- Alguns autores como Lima et Ribeiro (2009) recomendam para a proteção das fachadas expostas ao sol, tipologias de casas geminadas, com o intuito de proteger uma delas e manter um recuo em relação a rua, proporcionando a ventilação noturna (LIMA and RIBEIRO, 2009). Porém, Rodrigues et al aponta que os sombreamentos de fachadas não provocam nenhuma contribuição para a redução da temperatura interna do edifício, quando se utilizam paredes com baixa absorvância (RODRIGUES et al., n.d.).
- O trabalho de Sorgato (2009) complementa que o sombreamento tem maior efeito sobre as esquadrias abertas, protegendo o edifício da radiação direta e permitindo a circulação de ar (SORGATO, 2009), assim como a NBR 15220, que recomenda somente o sombreamento das esquadrias (ABNT, 2005).

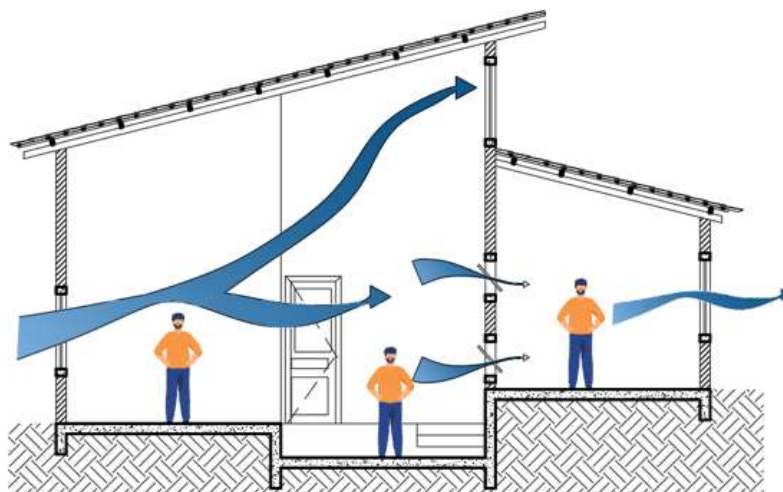
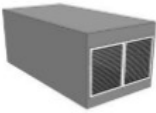
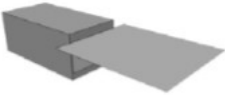
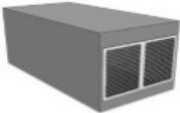
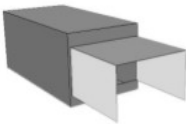
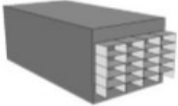


Figura 132 – Ventilação cruzada por efeito chaminé.

Souza et al (2018) verificou que o uso de aberturas sombreadas na zona 7 apresenta uma baixa contribuição que varia de 0 a 12%, quando comparado ao modelo sem proteção solar. Essas variações dependem da orientação da abertura e do tipo de dispositivo de sombreamento. Os dispositivos avaliados neste estudo foram 7, conforme visto na tabela 30. Dentre os dispositivos analisados, verificou-se que o PTI, protótipo com placas inteiras e verticais, e PTF, protótipo com placas horizontais e verticais filetadas, ambos detentores de elementos fixos de proteção solar com capacidade de barrar a radiação direta entre 7h40 e 16h20, têm maior eficiência por possuir elementos externos às esquadrias, permitindo assim maior sombreamento. O pior comportamento foi o protótipo com veneziana V90, que apresentou pouca contribuição para a redução do calor. As aberturas orientadas para leste com dispositivos de sombreamento têm maior contribuição para redução das temperaturas (SOUZA, SOARES, and ALVES 2018). Quanto à ventilação, recomenda-se o uso de uma ventilação seletiva em horários noturnos, de modo a manter as edificações protegidas do vento seco diurno e da radiação diurna, assim como o seu posicionamento para áreas verdes (Tabela 32) (LIMA and RIBEIRO, 2009).

Tabela 31 – Desempenho dos graus horas dos sistemas de sombreamento, comparados ao sistema sem sombreamento.

		NORTE	SUL	LESTE	OESTE
VRTQR		7%	3%	8%	7%
L23		10%	1%	8%	7%
TN		8%	2%	11%	12%
V90		0%	0%	2%	3%
V45		7%	5%	8%	8%
PTI		11%	3%	14%	12%
PTF		9%	3%	13%	10%

Fonte: (SOUZA, SOARES, and ALVES 2018)

A envoltória das edificações deve ter moderada transmitância térmica (U), para isso recomenda-se o uso de cores claras (oferecendo baixos valores de absortância) e a utilização de sombreamento (DACANAL et al. 2018). Assim, quando a absortância for $\alpha \leq 0,4$, recomenda-se o $U \leq 1,5 \text{ FV}$. No caso de coberturas com $\alpha > 0,4$, aconselha-se o uso de materiais com transmitâncias de $U \leq 1,5 \text{ FV}$ (ABNT 2013). O estudo de Paula (2017) para a cidade de Petrolina aponta para o uso de

coberturas isoladas com $U \leq 0,5$, que provocam a redução de $2,2^{\circ}\text{C}$ da temperatura interna nos dias mais quentes (DE PAULA 2017). Olartechea et al, em Cuiabá, verificou que o uso forro de laje maciça com $U = 2,05\text{W/m}^2\text{K}$ ou de telha metálica termoacústica, com transmitância de $0,85\text{W/m}^2\text{K}$ apresenta um desempenho significativo, quando comparado com edificações sem forro e coberturas cerâmicas. A cobertura em telha cerâmica com laje maciça gerou uma redução de $1,7^{\circ}\text{C}$ e o aumento da temperatura mínima em $1,4^{\circ}\text{C}$, enquanto a telha termo-acústica teve um bom desempenho, com uma redução de $2,7^{\circ}\text{C}$ na temperatura máxima e um aumento de $1,3^{\circ}\text{C}$, quando comparada a uma habitação padrão sem forro com telha cerâmica (OLARTECHEA et al. 2015).

Outra recomendação para cobertura é proposta por Lima and Ribeiro (2009) e Medeiros, Carlos, & Elali, (2011), que indicam o uso de coberturas com alta inércia térmica e com baixa transmitância, como lajes e coberturas verdes. As lajes, se forem utilizadas, devem ter grande espessura ou ser preenchidas de material que aumente sua inércia térmica ou as proteja da radiação solar (areia, terra com gramado, água, tijolo furado ou pedra argila expandida com água etc.) (LIMA and RIBEIRO 2009) e (MEDEIROS and ELALI 2011).

Para a parede, seguem-se as mesmas recomendações para a zona 5 (ABNT 2013a), mas buscando estratégias de massa térmica para o aquecimento, com média ou baixa absorptância, $\alpha \leq 0,6$; paredes com transmitância e capacidade térmica moderada $U \leq 3,7\text{ W/m}^2.\text{K}$ e $CT \geq 130\text{ KJ/m}^2\text{K}$. Em simulações realizadas por Dopler na cidade de Teresina, verifica-se que o uso de paredes espessas de tijolos cerâmicos (20cm + 4cm de argamassa) ajuda na redução das temperaturas internas, com a redução de 10% dos graus horas resfriamento (DOFLER and KRUGER 2016) (ver Tabela 33).

Tabela 32 – Recomendações para envoltória Zona bioclimática 7

Propriedades	Unidades	Coberturas		
α	-	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	$\alpha \leq 0,6$
U	$\text{W/m}^2\text{K}$	$U \leq 2,3\text{ FV}$	$U \leq 1,5\text{ FV}$	$U \leq 3,7$
CT	$\text{KJ/m}^2\text{K}$	-	-	$CT \geq 130$

Fonte: (ABNT, 2013)

Lima et Ribeiro (2009) e Ferreira (2014) apontam o uso de paredes pesadas feitas em adobe, pedra ou tijolos cerâmicos espessos com baixa transmitância térmica, isto é, com $U \leq 2,20\text{ W/m}^2.\text{K}$. É

sugerido também o uso de paredes duplas com câmara de ar fechada (LIMA and RIBEIRO 2009) e (C. FERREIRA, SOUZA, and ASSIS 2014). Porém, a pesquisa de Olartechea et al na cidade de Cuiabá verificou que a redução da transmitância das paredes de $U = 2,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ para $U=1,97 \text{ W/m}^2\text{K}$, ambas com $\alpha = 0,3$, apresentou um impacto mínimo nas temperaturas internas, havendo uma redução na temperatura máxima de $0,4^\circ\text{C}$ e na temperatura mínima de $0,2^\circ\text{C}$ (OLARTECHEA et al. 2015). Quando comparadas às exigências de desempenho da NBR 15220, verifica-se que as paredes com absorvância 0,3 em outras zonas bioclimáticas, independentemente do valor da transmitância, apresentam-se sempre dentro do desempenho intermediário (CHVATAL, 2014).

Em geral, as pesquisas demonstram que a variação da transmitância térmica das paredes apresenta um impacto muito pequeno se comparado às coberturas, devido ao fato de as coberturas estarem expostas ao sol por um tempo maior do que as paredes, dependendo da radiação direta da orientação.

Em síntese, a zona bioclimática 7 por apresentar um clima seco, semiárido e quente, as recomendações são as seguintes:

- As habitações a serem construídas devem apresentar plantas compactas e sua distribuição espacial devem ser compactas com pátios internos de modo a evitar a insolação direta sobre as paredes.
- Quanto a ventilação deve ser seletiva somente no período noturno de modo a retirar o calor diurno acumulado na edificação.
- As aberturas devem ser pequenas e sombreadas, representando pelo menos 7% da área do ambiente.
- Quanto à envoltória, as paredes são recomendadas paredes com $\alpha \leq 0,6$, $U \leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT \geq 130$.
- No caso das coberturas, a NBR 15575 aponta para o uso de ático ventilado desde que as coberturas apresentem os seguintes parâmetros $\alpha \leq 0,4$ e $U \leq 2,3 \text{ W/m}^2\text{K FV}$ ou $\alpha > 0,4$ e $U \leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K FV}$. Enquanto Olartechea (2014) e Paula (2017) sugerem o uso de coberturas isoladas (Tabela 34 e Figura 1Figura 133).

Tabela 33– Síntese das recomendações térmicas para habitação econômica na ZB 7.

Parâmetros	Zona 7		
Clima	seco, semiárido e quente		
Planta de situação	Plantas compactas com pátios internos		
Orientação	-		
Espaçamento entre construções	Distribuição compacta		
Circulação de ar	Ventilação seletiva		
	Resfriamento evaporativo		
	Noturna		
Dimensões das aberturas	$A \geq 7\%$		
Dispositivos de controle	Aberturas de ar controláveis		
Proteção da abertura	Sombrear as aberturas		
Paredes	$a \leq 0,6$		
	$U \leq 3,7$ e $CT \geq 130$		
Coberturas	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	$\alpha > 0,6$
	$U \leq 2,3 \text{ FV}$	$U \leq 1,5 \text{ FV}$	$U \leq 0,85$

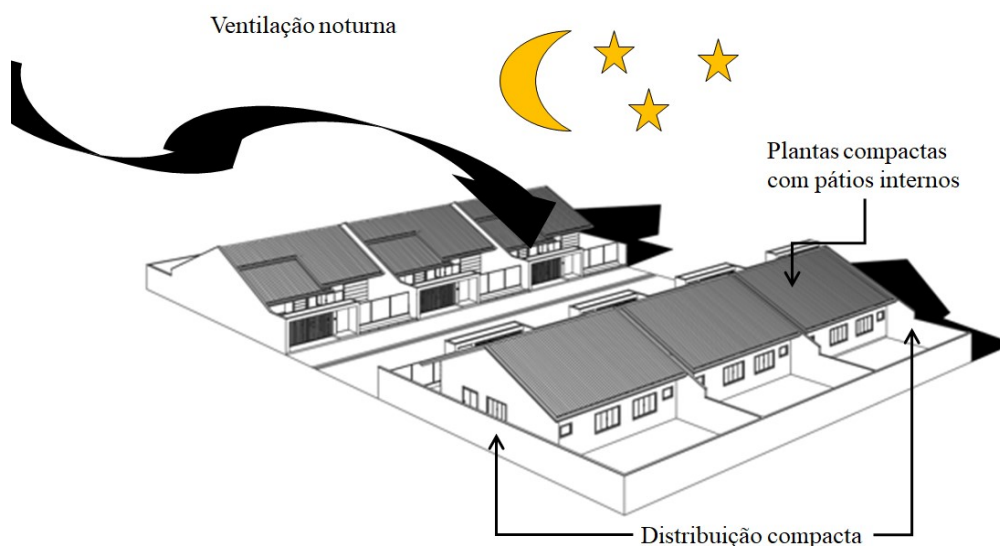


Figura 133- Estratégias bioclimáticas para zona 7.

4.3. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

A zona 8 contempla somente a capital Fortaleza, que se enquadra no clima Aw Tropical com inverno seco (Aw) e subúmido seco (C1), representando uma pequena parcela do território nas regiões litorâneas e na parte inferior das regiões mais elevadas. A zona bioclimática 8 apresenta três níveis de desempenho: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), onde se apontam parâmetros que relacionam as temperaturas internas (T_i) e externas máximas (T_e), conforme a Tabela 34 (ABNT 2013b).

Tabela 34 – Critérios de avaliação de desempenho térmico para o verão.

Nível de desempenho	Zona 08
Mínimo (M)	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
Intermediário (I)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^\circ \text{C})$
Superior (S)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^\circ \text{C})$
	$T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^\circ \text{C})$

Fonte: (ABNT 2013b).

Em termos de implantação, recomenda-se o seguinte:

- as edificações devem apresentar formas longitudinais orientadas com a maior dimensão no eixo leste-oeste,
- a disposição de edificações espaçadas para favorecer a penetração de vento (Figura 134) (C. FERREIRA, SOUZA, and ASSIS, 2014),
- quanto à orientação, verifica-se que a pior orientação se dá para os cômodos voltados ao Norte (DOFLER and KRUGER, 2016).

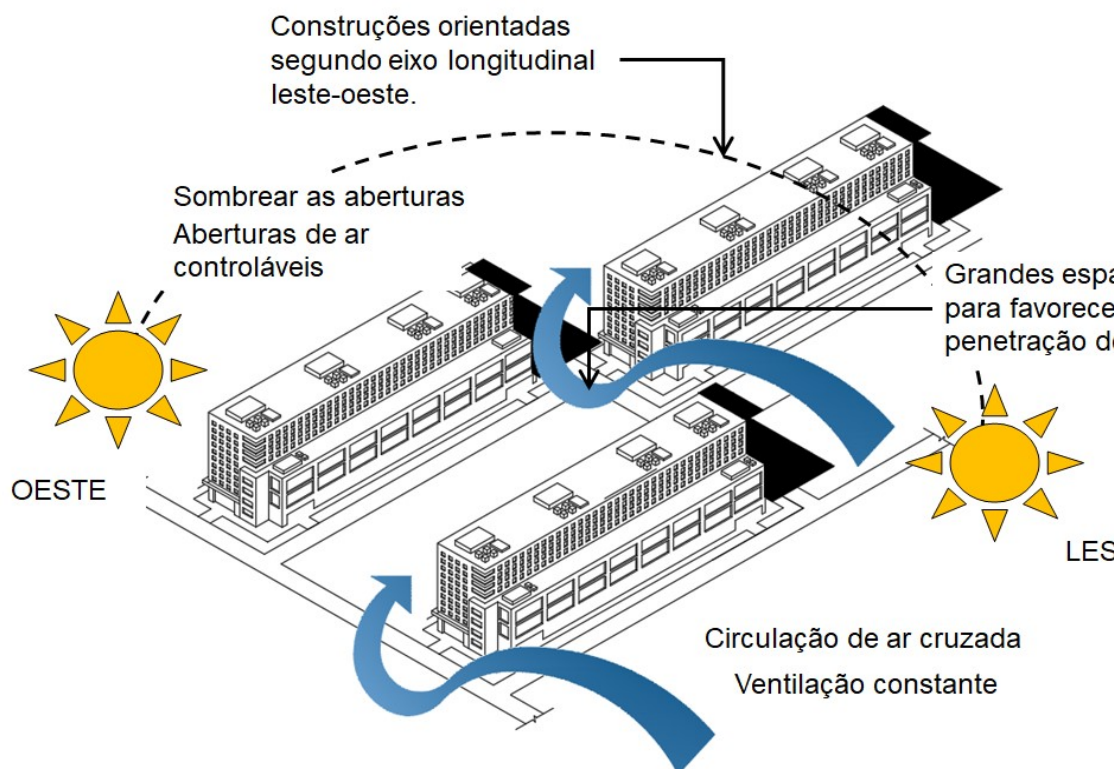


Figura 134 – Estratégias bioclimáticas para zona 8.

Quanto aos parâmetros de aberturas e renovação de ar recomenda-se:

- o uso da ventilação cruzada com aberturas de ar controláveis (FERREIRA, SOUZA, and ASSIS, 2014), permitindo a desumidificação do ar,
- a ventilação deve ter dispositivos de controle como venezianas e brises móveis, devido ao excesso de vento (Figura 135),
- para as aberturas, recomenda-se que sejam sombreadas com área de $A \geq 8\%$ da área do piso do ambiente a ser ventilado (ABNT, 2013),

- o sombreamento deve ser promovido por beirais de 25 a 100cm que oferecem uma pequena redução de 5% do consumo de graus horas resfriamento (DOFLER and KRUGER, 2016).

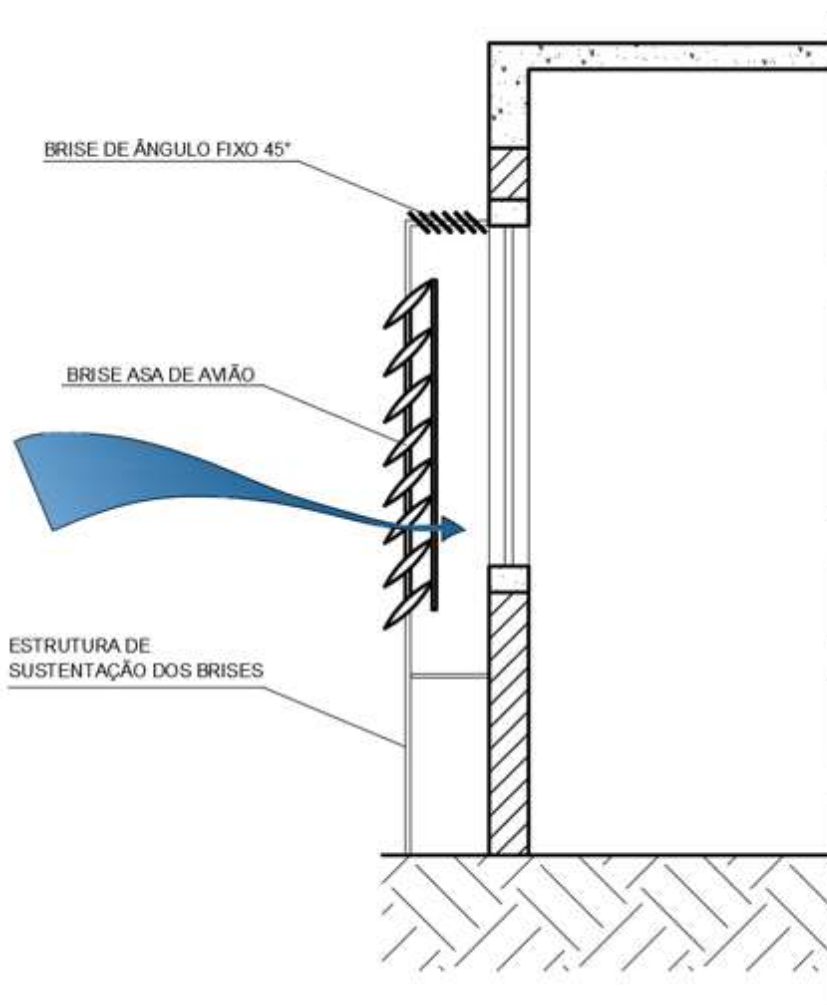


Figura 135 – Detalhe de janelas com o controle de ventilação e iluminação.

Dentre as recomendações para envoltória, são sugeridas pela ABNT (2013) coberturas de $U \leq 2,3 \text{ FV}$, quando apresentar cores claras com $\alpha \leq 0,4$; e $U \leq 1,5 \text{ FV}$, quando apresentar cores escuras deve ter $\alpha > 0,4$. Em simulações realizadas por Dopler e Kruger (20016) às paredes na cidade de Recife, verificou-se que o uso de paredes espessas de tijolos cerâmicos (20cm + 4cm de argamassa) ajudam na redução as temperaturas internas na redução dos graus horas resfriamento a 15% (DOFLER and KRUGER 2016). (Tabela 35).

Tabela 35 – Recomendações para envoltória Zona bioclimática 8.

Propriedades	Unidades	Coberturas		Paredes
α	-	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	$\alpha a \leq 0,6$
U	W/m^2K	$U \leq 2,3 FV$	$U \leq 1,5 FV$	$U \leq 3,7$
CT	KJ/m^2K	Sem recomendações	Sem recomendações	≥ 130

Fonte: (ABNT, 2013)

Nos experimentos de Chvatal (2014), verificou-se que a absorptância da envoltória apresenta maior influência do que a transmitância. A absorptância é uma propriedade que atua sobre a superfície dos materiais, funcionando como uma espécie de filtro em relação à entrada de radiação, enquanto a transmitância atua dentro do componente a partir da quantidade de calor absorvido. Desse modo, em coberturas de cores claras, isto é, com $\alpha \leq 0,3$; o efeito da transmitância térmica é reduzido, como demonstrado nas simulações desenvolvida por Chavtal (2014) para cidade de Manaus (Figura 136). Quando comparadas às exigências de desempenho da NBR 15220, verifica-se que as coberturas com absorptância 0,3, combinadas com transmitâncias variando entre 1 e 4,5 W/m^2K , apresentam-se sempre dentro do desempenho intermediário (CHVATAL, 2014). A geometria da cobertura é também determinante, destacando as coberturas com abóbadas com a que proporciona uma maior reflexão da radiação solar (LIMA and RIBEIRO, 2009).

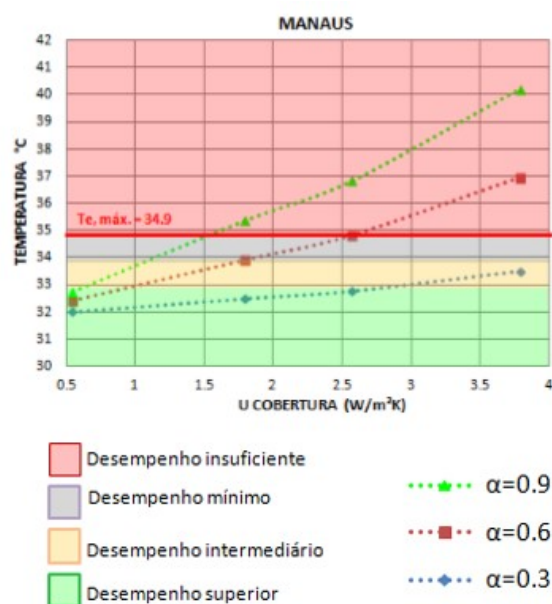


Figura 136- Desempenho da variação da transmitância e absorptâncias de coberturas na cidade de Manaus, zona bioclimática 8. Fonte: (CHVATAL, 2014).

Por outro lado, verifica-se que as paredes têm uma influência bem menor do que as coberturas quando se varia a sua transmitância ou absorptância. O aumento da transmitância no intervalo de 1,00 a 4,39 W/m².K em paredes claras ($\alpha \geq 0,3$) não traz um aumento significativo de temperatura máxima do ar interno (ver o exemplo da cidade de Manaus, pertencente à zona bioclimática 8) (Figura 137) (CHVATAL, 2014).

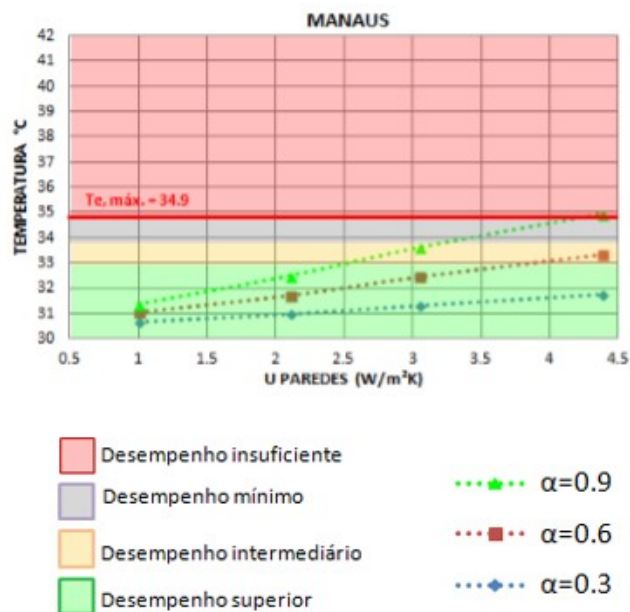


Figura 137– Desempenho da variação da transmitância e absorptâncias de paredes na cidade de Manaus, zona bioclimática 8. Fonte: (CHVATAL, 2014).

A zona 8 por apresentar um tropical com inverno (Aw) e sub-úmido seco (C1), recomenda-se que (Tabela 36 e Figura 138):

- A planta das edificações deve ser longitudinal e implantadas de forma espaçada de modo captar melhor a ventilação e retirar o excesso de humidade.
- A ventilação deve ser constante, aberturas devem ser sombreadas com área mínima de 8% da área do piso e controláveis de modo evitar o excesso de vento.
- Quanto envoltória, as paredes são recomendadas paredes com $\alpha \leq 0,6$, $U \leq 3,7$ W/m².K e CT ≥ 130 .
- Quanto as coberturas, a NBR 15575 aponta para o uso de ático ventilado desde que as coberturas apresentem os seguintes parâmetros $\alpha \leq 0,4$ e $U \leq 2,3$ W/m².K FV ou $\alpha > 0,6$ e $U \leq 1,5$ W/m².K FV.

Tabela 36 – Síntese das recomendações térmicas para habitação econômica na Zona bioclimática 8.

Parâmetros	Zona 8
Clima	Tropical com inverno (Aw) e sub-úmido seco (C1)
Planta de situação	Construções orientadas segundo eixo longitudinal leste-oeste
Orientação	Voltadas para o vento dominante
Espaçamento entre construções	Grandes espaçamentos para favorecer a penetração de vento
Circulação de ar	Circulação de ar cruzada
Ventilação	Constante
Dimensões das aberturas	$A \geq 8\%$
Dispositivos de controle	Aberturas de ar controláveis
Proteção da abertura	Sombrear as aberturas
Paredes	$a \leq 0,6$; $U \leq 3,7$ e $CT \geq 130$
Coberturas	$\alpha \leq 0,4$ e $U \leq 2,3$ +ático ventilado
	$\alpha > 0,6$ e $U \leq 1,5$ +ático ventilado
Sistema artificial	não

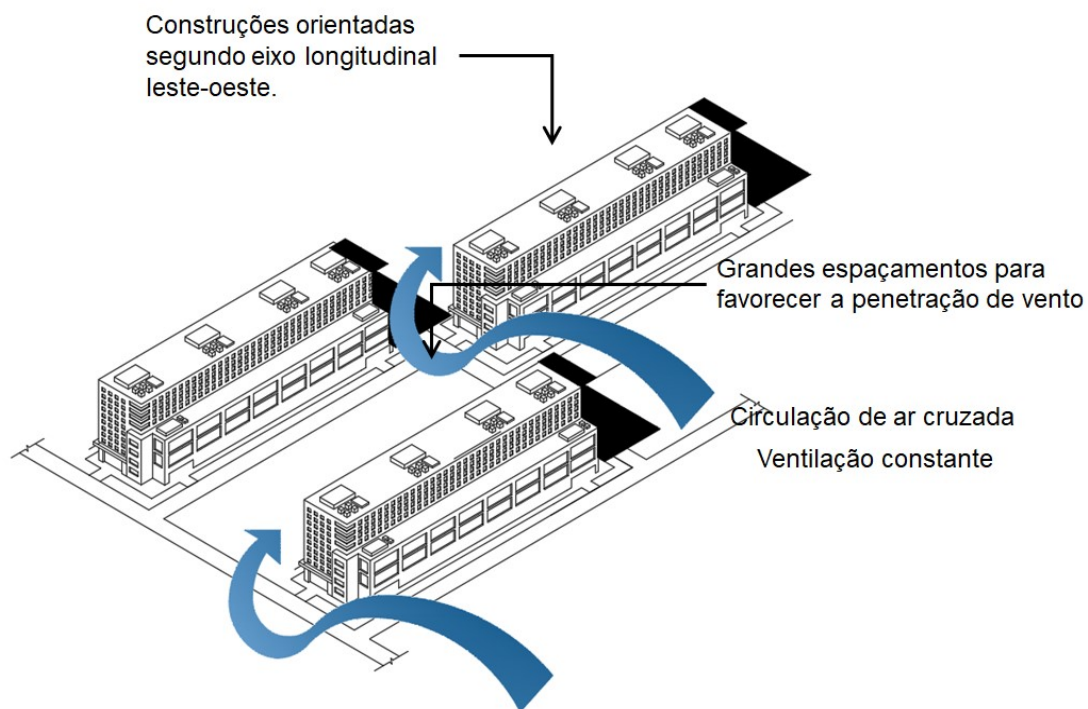


Figura 138 - Estratégias bioclimáticas para zona 8

Segundo a NBR 15575 as cidades do Ceará, se enquadram em 3 tipos **zona climáticas** a 5,7 e 8. Os parâmetros levantados foram a implantação, a circulação de ar e as propriedades térmicas da envoltória adequados às construções de adobe tradicionais:

- Em termos de **implantação**, para zona 5 e 7 são recomendadas casas compactas e de preferência geminadas. Enquanto na zona 8 recomenda-se plantas longitudinais espaçadas de modo permitir uma boa captação de ventilação.
- A **circulação de ar** da zona 5 deve-se realizar por ventilação seletiva de preferência no período diurno. Na zona 7 a ventilação, também, deve ser seletiva, porém, no turno da noite. No caso da zona 8, a ventilação deve ser constante. Em todas, recomenda-se o uso de coberturas sombreadas.

5. CARACTERIZAÇÃO DO MODELO PMCMV RURAL

O PMCMV rural no Ceará detém duas tipologias habitacionais, que se aplicam em todo estado sem haver uma distinção de forma ou materiais em relação as variações climáticas de cada cidade. Todas apresentam os mesmos materiais: coberturas em telha cerâmica sem forro e paredes de tijolos cerâmicos com argamassa cimentícia. Quanto à arquitetura, todas as tipologias possuem 1 sala, 1 cozinha e 1 banheiro, o que as diferencia é o número de quartos. A tipologia 1 apresenta 2

quartos com uma área de 39,82m². A tipologia 2 por sua vez detém 2 quartos com uma área de 65m² (Figura 139 a Figura 142).

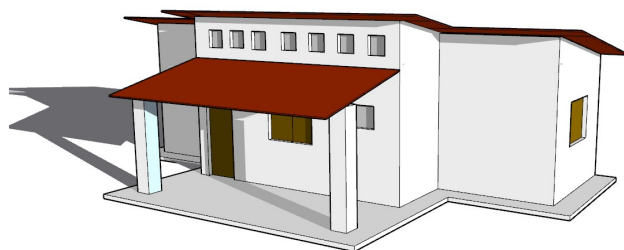


Figura 139 - Perspectiva tipologia 1 – PMCMV Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).

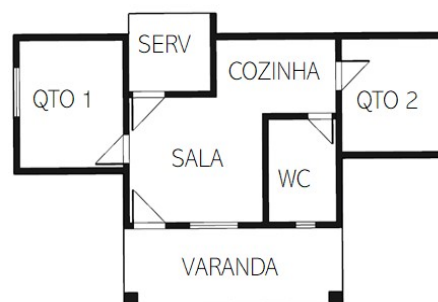


Figura 140 - Planta tipologia 1 – PMCMV Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).



Figura 141 - Perspectiva tipologia 2 – PMCMV Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).

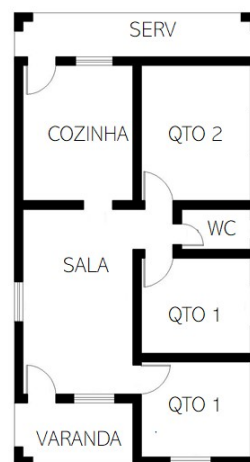


Figura 142 - Planta tipologia 2 – PMCMV Rural. Fonte: (Secretaria das Cidades, 2013).

Como as **propriedades térmicas** da envoltória dependem dos materiais que compõem a edificação foi feito nesta fase uma comparação dos sistemas construtivos adotados nas casas de adobe e das casas do PMCMV rural.

O sistema construtivo das habitações tradicionais em adobe são, em forma geral constituídas do seguinte modo:

- As coberturas são construídas em telhas cerâmicas sem forro.
- As paredes podem ser simples ou dobradas com espessuras de 17,0 a 48,0cm.
- As paredes em adobe apresentavam 3 tipologias de reboco: cal, terra e solo cimento.

- Os blocos de adobe têm uma variação dimensional entre 14 e 22cm de espessura.
- As alvenarias podem ser rebocadas com argamassa de terra, cal, solo cimento ou sem reboco, no caso das áreas úmidas como banheiro e cozinha é comum o uso de revestimento cerâmico.

As casas do PMCMV no Ceará têm adotado o seguinte sistema construtivo:

- coberturas em telha cerâmica sem forro. No entanto, (OLARTECHEA et al, 2015) e (ABNT, 2005) apontam que a adoção de forros como laje volterrana, gesso e PVC oferecem um bom desempenho às habitações nas zonas 5, 7 e 8.
- paredes de alvenaria de tijolo cerâmico vazado com blocos de 14cm de espessura são rebocadas com argamassa de areia e cimento.

5.1. PROPRIEDADES TÉRMICAS DA CASAS EM ADOBE E DO PMCMV

A partir das especificações recolhidas para o sistema construtivo de **paredes e coberturas**, foram calculadas **propriedades térmicas** de ambos os sistemas, recomendadas pela NBR 15575 (ABNT 2013b), como transmitância, capacidade térmica e absorvância das paredes e coberturas. O cálculo se deu a partir de informações geométricas do modelo MCVM e as propriedades específicas (densidade, condutibilidade térmica, calor específico e absorvância) dos materiais foram extraídas da NBR 15220 (ABNT 2005), com exceção da argamassa de cal e do adobe, que extraímos da literatura especializada como (GOMES, FARIA and GONÇALVES, 2017); (DELGADO and GUERRERO, 2006); (MINKE, 2012), (MAZRIA, 1979), (PERRIGAULT et al. 2012), (HASSANAIN, HOKAM, and MALLICK, 2011), (HEATHCOTE, 2011); (MATOS and SANTOS, 2006) e (ANTONELLO et al, 2006), descritos no capítulo 2. Estado da Arte (Tabela 38).

Tabela 37 – Parâmetros para os tipos de paredes e coberturas para habitações em adobe

Propriedades térmicas	Unidade	Telha cerâmica	Tijolo cerâmico	adobe	Argamassa em cal	Argamassa cimentícia
e	m	0,01	0,09 a 0,19	0,14 a 0,22	0,015	0,015
p	m ² .K	1300	1450	1834	1400	1800-2100
λ	kJ/m ² .K	0,9	0,9	0,8	0,75	1,15
c	-	920	920	880,36	840	1,00
α	m	0,75	-	-	0,2	-

Quanto às variações das coberturas para qualquer sistema construtivo adobe ou tijolo cerâmico, a opção de telha cerâmica sem forro com espessuras (e) de 0,03m apresenta as seguintes propriedades térmicas: transmitância térmica (U) de 4,55 m².K, capacidade térmica (CT) de 18 kJ/m².K e absorvância (α) de 0,75. A tipologia telha cerâmica sem forro não atende às recomendações da transmitância térmica, independente da absorvância, para a zona 5, onde se recomenda $U \leq 2,3$; quando $\alpha \leq 0,6$ e $U \leq 1,5$; quando $\alpha > 0,6$. O mesmo ocorre para as zonas 7 e 8, pois se recomenda $U \leq 2,3$ com ático ventilado, quando $\alpha \leq 0,4$; e $U \leq 1,5$ com ático ventilado, quando $\alpha > 0,6$. Mesmo implantado os tipos de forros específicos apresentados, verifica-se que somente com a telha pintada é possível atingir as recomendações da norma como $\alpha > 0,6$ e $U \leq 2,3$ (Tabela 38).

Tabela 38 – Propriedades térmicas e custos dos tipos de coberturas

Propriedade térmica	Unidade	sem forro	sem forro com telha pintada	Laje volterrana	Forro de gesso	Forro PVC
Espessura	m	0,03	0,03	0,12m + camada de ar	0,01m + camada de ar	0,008m + camada de ar
U	m ² .K	4,55	4,55	1,75	2,04	1,74
CT	kJ/m ² .K	18	18	391,26	28,76	21,4
α	-	0,75	0,2 a 0,9	-	-	-

Fonte: (SAMPAIO et al, 2011)

As habitações PMCMV são construídas com paredes de tijolos cerâmicos com 14cm revestidos com argamassa cimentícia de 1,5cm em ambos os lados com espessura total de 17cm. As propriedades térmicas destas paredes apresentam transmitância térmica igual a 2,22 m².K, capacidade térmica igual a 144,62 e absorvância entre 0,2 a 0,9, dependendo da cor da pintura do reboco.

Em termos de transmitância e capacidade térmica, a parede de adobe apresenta o seguinte comportamento: quanto maior a sua espessura, menores são suas transmitâncias (U) e maiores são suas capacidades térmicas (CT). Dentre as paredes de adobe, a parede de cal é aquela que possui os menores valores de transmitância térmica (U) capacidade térmica, sendo CT = 277,76 a 773,76 kJ/m².K, enquanto as paredes de solo cimento apresentam os maiores valores de transmitância e capacidade térmica.

Quanto a capacidade térmica segundo a NBR 15575, tanto a parede de adobe quanto a de tijolo cerâmico atendem aos parâmetros das zonas bioclimáticas, por apresentarem valores de CT ≥ 130 kJ/m².K. Por outro lado, atendem parcialmente às recomendações de transmitância térmica dependendo da absorvância:

- Quando as paredes apresentam absorvância $a \leq 0,6$ em todas as opções, as alvenarias de tijolo cerâmico e de adobe atendem às recomendações para transmitância, com $U \leq 3,7$ m².K.
- Já com valores de absorvância $a \leq 0,6$, todas as paredes com espessura mínima de 17cm se aproximam das recomendações de $U \leq 2,20$ m².K.

As paredes de adobe, por apresentarem espessura acima de 17cm, conseguem atender a esses valores, pois apresentam valores entre 1,28 à 2,54 m².K (Tabela 39). Porém, quanto maior sua espessura, maior sua capacidade térmica, que pode ser prejudicial para climas quentes, por elevar a sua inércia térmica.

Tabela 39 - Parâmetros para habitações em PMCMV e adobe

Parâmetros	Unidades	Alvenaria de tijolo cerâmica	Alvenaria de adobe		
Bloco	-	Tijolo cerâmico	Adobe	Adobe	Adobe
Argamassa	-	Cimento	Solo cimento	Terra	Cal
Espessura	m	17	17 a 48	17 a 48	17 a 48
U	m ² .K	2,22	1,25 a 2,34	1,30 a 2,25	1,28 a 2,54
CT	kJ/m ² .K	144,62	280,04 a	346,88 a	277,76 a
			760,04	762,88	773,76
α	-	0,2 a 0,8	0,2 a 0,8	0,2 a 0,8	0,2 a 0,8

A partir da compreensão do comportamento das coberturas e paredes de adobe em relação às recomendações da NBR 15575, verifica-se a necessidade encontrar um ponto de equilíbrio, entre as propriedades térmicas absorvância, transmitância e capacidade térmica, das paredes e coberturas e o custo final da habitação.

No modelo padrão PMCMV, verifica-se que a telha cerâmica sem forro apresenta valores de transmitância muito elevados, fora das recomendações normativas para cada zona bioclimática. O meio de adequar as coberturas, reduzindo a transmitância térmica, é a utilização de forro (ABNT 2005) e isolamento térmico (OLARTECHEA et al, 2015). Os forros recomendados pelo programa PMCMV são os forros de gesso, PVC e laje volterrana. Além da transmitância térmica, as coberturas com baixas absorvância, isto é, de cores claras, contribuem, segundo Chvatal (2014), para redução de temperaturas internas.

Também foi observado que as paredes de adobe com maiores espessuras apresentam baixos valores de transmitância térmica. Porém, com o aumento das espessuras, ocorre uma elevação da capacidade térmica, o que não é recomendado para climas tropicais, por serem climas de baixa amplitude térmica. Assim, como não existem parâmetros normativos para o adobe em climas tropicais, sejam secos ou úmidos, faz-se necessário investigar um ponto de equilíbrio entre a transmitância e capacidade térmica, a partir de suas espessuras, e verificar quais tipos de cobertura que melhor se adequam ao comportamento do adobe. Para isso, foram realizadas simulações na fase seguinte em uma casa padrão PMCMV rural, com dois tipos de alvenaria adobe e tijolo

cerâmico e depois avaliado seu comportamento térmico na plataforma Energy Plus para as três zonas bioclimáticas do Ceará zonas 5, 7 e 8.

5.2. MODELAGEM TÉRMICA

A caracterização do modelo térmico PMCMV rural consistiu na modelagem e análise térmica de duas tipologias: o tipo A, de alvenaria de tijolo cerâmico, e o B, em adobe. A modelagem geométrica foi realizada na plataforma Design Builder e a simulação térmica na plataforma Energy Plus. As análises ocorreram em 3 cidades localizadas em zonas bioclimáticas distintas no Estado do Ceará: Guaramiranga, Crateús e Fortaleza, que representam as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 e possuem construções em adobe. As variáveis às quais os modelos foram submetidos são orientações e cômodos.

Durante o processo de simulação foi escolhida a simulação da tipologia 2 com 3 quartos, pelo fato de representar uma maior complexidade em termos de desempenho térmico, isto é, um maior número de cômodos de permanência para garantir o conforto térmico. Após a validação dos parâmetros com a tipologia 3 quartos, foi realizada a simulação com uma tipologia de 2 quartos, utilizando-se das diretrizes térmicas desenvolvidas, variando os tipos de alvenaria, de modo realizar uma análise comparativa entre o desempenho térmico da alvenaria de tijolo cerâmico e adobe.

Os parâmetros considerados para construção do modelo foram os mesmos recomendados por (WESTPHAL, 2007): clima, tipologias arquitetônicas, orientação, paredes, cobertura, piso e janelas, infiltração de ar, iluminação e equipamentos elétricos e pessoas.

5.2.1. CLIMA

Os climas selecionados foram de três cidades que representassem no Estado do Ceará as suas zonas bioclimáticas. Assim, escolheu-se as cidades de Guaramiranga, Crateús e Fortaleza, que correspondem às zonas bioclimáticas 5, 7 e 8. Os dados climáticos utilizados foram extraídos do site do laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que apresenta arquivos climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) compatíveis com a plataforma Energy PLUS (PROJETEEE, 2020).

Como apresentado anteriormente, o clima tropical do Estado do Ceará apresenta variações de temperatura e umidade de acordo com a sua localização geográfica em particular com o relevo de cada cidade e com a proximidade em relação à zona litorânea. Assim, cada cidade tem caracterizações climáticas distintas: Guaramiranga, cidade com 800m de altitude e a 105km do

litoral, inserida na zona 5, está classificada como tropical com inverno seco (Aw) e subúmido chuvoso (C1); Crateús, com altitude de 274m e localizada a 350km do litoral, pertencente à zona 7, apresenta classificação de clima seco, árido e quente (BSh) e semiárido (D); Fortaleza, cidade litorânea com 21m de altitude, está inserida na zona 7 e apresenta o clima tropical com inverno seco (Aw) e subúmido seco (Tabela 40).

Tabela 40 – Caracterização climática das zonas 05, 07 e 08

Cidade	Altitude	Distância Litoral	Koppen	Thornthwaite	Zona
Guaramiranga	800m	105km	Aw – tropical com inverno seco	C2 – subúmido chuvoso	5
Crateús	274m	350km	BSh – Seco, árido e quente	D - Semiárido	7
Fortaleza	21m	0km	Aw - tropical com inverno seco	C1 - subúmido seco	8

Quanto à **umidade**, a cidade de Guaramiranga é aquela que apresenta sempre a maior média mensal, variando de 82,83 a 93,7%, seguida por Fortaleza com variações entre 80,06 a 89,72%. Por sua vez, Crateús apresenta com as médias mensais mais baixas, entre 46,7% a 84,3%. Os meses mais secos vão do período de setembro a dezembro e os mais úmidos correspondem ao período de março a junho (Figura 143).

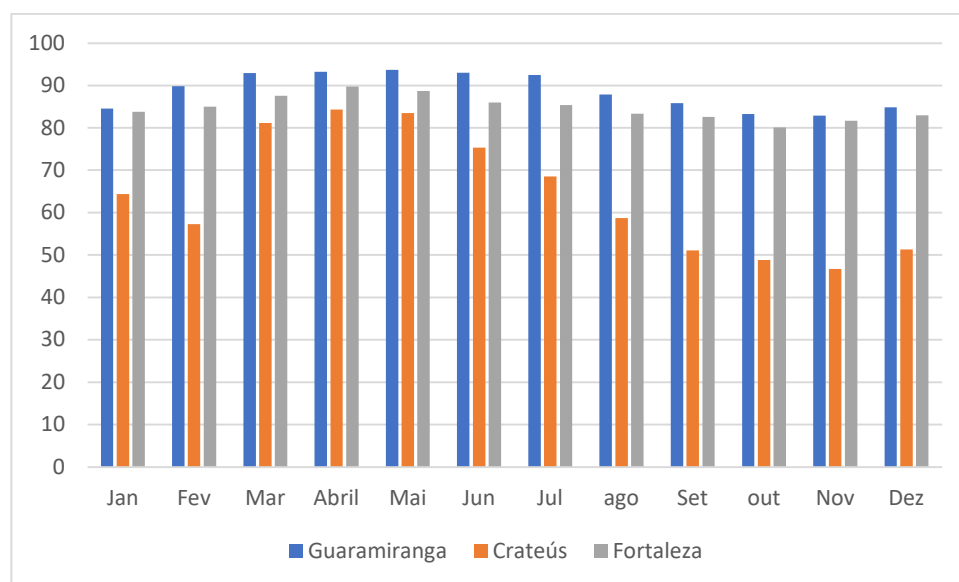


Figura 143 – média mensal de umidade das cidades de Guaramiranga, Crateús e Fortaleza.

Em termos de **temperatura**, a zona bioclimática 5, representada pelo município de Guaramiranga, apresenta as temperaturas mais amenas quando comparadas com outros climas. As suas temperaturas variam de 16,71 a 28,44 °C, apresentando uma média anual de 20,69 °C. Enquanto a zona bioclimática 7, representada pela cidade de Crateús, atinge as maiores temperaturas e amplitudes térmicas, variando de 17,64 a 37,67 °C, com média de 27,09 °C. Por fim, temos a zona bioclimática 08, representada pela cidade de Fortaleza, a capital do Estado, apresentando temperaturas que variam de 21,18 a 32,18°C com uma média de 26,65°C (Tabela 41).

Tabela 41 – Temperaturas médias, mínimas e máximas das zonas 05, 07 e 08.

	Zona 05	Zona 07	Zona 08
Temperatura	Guaramiranga	Crateús	Fortaleza
Média (°C)	20,69	27,09	26,65
Mínima (°C)	16,71	17,64	21,18
Máxima (°C)	28,44	37,67	32,18

Além dos dados climáticos contidos nos arquivos EPW, a plataforma Energy Plus exige os dados da **temperatura do solo** mensal média de cada cidade. Neste trabalho, a temperatura dos solos foi calculada em função da temperatura do ar, como recomenda a RTQ-R (2012) (Eletrobras/Procel and CB3E 2012). A equação descreve a temperatura a 5cm (T5) de profundidade em função da temperatura do ar (Tar), ao utilizarmos a metodologia de Sena (2012) para calcular a temperatura do solo a cada mês em função da temperatura do ar. Essa equação é:

$$T5=0,6 Tar+7,4 \quad (1)$$

As cidades escolhidas atingem os valores máximos de temperatura do solo nos meses de novembro, para a cidade de Crateús, e dezembro, para as cidades de Guaramiranga e Fortaleza, o que corresponde ao período mais seco para todas as cidades. Enquanto o período em que a temperatura do solo atinge os menores valores corresponde aos meses de julho, em Guaramiranga, abril, em Crateús e em maio, em Fortaleza, o período da estação chuvosa. Guaramiranga apresenta sempre os menores valores, pois a temperatura do solo e a do ar são fruto da radiação solar. Já Fortaleza e Crateús apresentam temperaturas médias aproximadas (Tabela 42).

Tabela 42– Temperatura dos solos

	Guaramiranga	Crateús	Fortaleza
Janeiro	20,25 °C	23,84 °C	23,86 °C
Fevereiro	19,92 °C	24,92 °C	23,44 °C
Março	19,84 °C	22,64 °C	23,06 °C
Abril	19,90 °C	22,40 °C	22,93 °C
Maiο	19,79 °C	22,52 °C	22,90 °C
Junho	19,54 °C	22,46 °C	22,98 °C
Julho	19,24 °C	22,58 °C	22,91 °C
Agosto	19,43 °C	23,24 °C	23,18 °C
Setembro	19,70 °C	24,32 °C	23,66 °C
Outubro	19,85 °C	24,74 °C	23,68 °C
Novembro	20,04 °C	25,10 °C	24,01 °C
Dezembro	20,26 °C	24,92 °C	24,09 °C

5.2.2. TIPOLOGIA ARQUITETÔNICA

O modelo PMCMV é composto de 6 cômodos: sala, cozinha, 3 quartos e banheiro, apresentando uma área total de 65m². Porém, na modelagem considerou-se 5 zonas térmicas, pois a sala e cozinha foram consideradas uma única zona, tendo em conta que estão interligados por um vão sem porta. Mesmo sendo modelada a zona térmica do banheiro, o seu comportamento não foi considerado, pois não é uma zona de permanência. Quanto ao pé direito dos cômodos, houve uma certa variação, pelo fato de a casa não apresentar forro, tendo a altura mínima de 2,40m e máxima de 3,80m (Figura 144 e Figura 145).

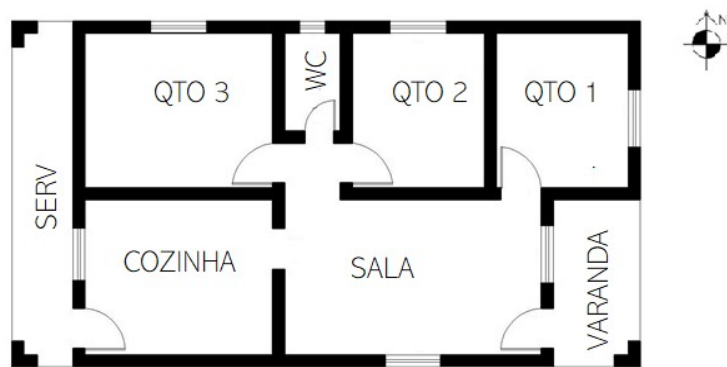


Figura 144 – Planta Baixa da tipologia 2 MCVM do estado do Ceará

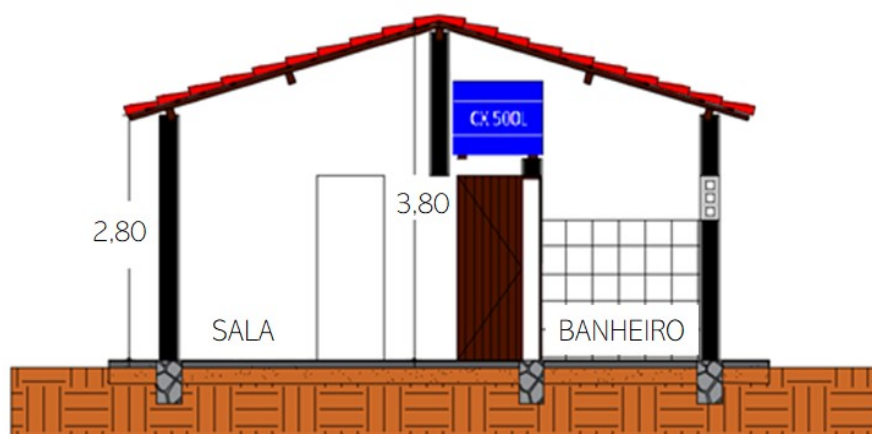


Figura 145 – Corte transversal da tipologia 2 MCVM do estado do Ceará

5.2.3. ORIENTAÇÃO

De modo a compreender o comportamento do edifício em orientações distintas, optou-se em rodá-lo a cada 90°, tendo como referência o modelo com azimuth Az0 com a entrada principal voltada para Norte. Assim, a cada rotação foi possível obter 4 orientações principais: norte, sul, leste e oeste para cada ambiente e perceber qual o impacto da radiação solar sobre cada uma (Figura 146).

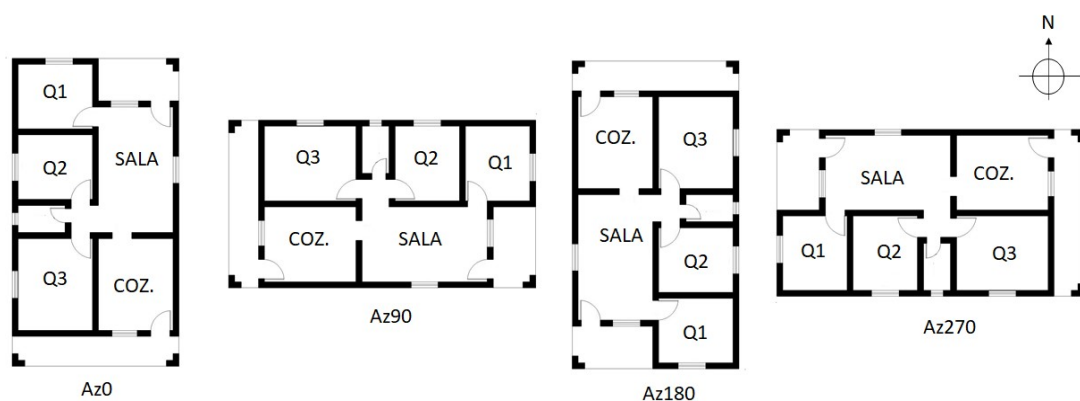


Figura 146 – Variáveis orientações

5.2.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS PAREDES, COBERTURA E PISO

Os materiais que compõem os tipos A e B são similares, com exceção das paredes, que apresentam materiais distintos:

As **fundações** são de pedra argamassada de cimento, com baldrame e tijolo cerâmico. O **piso**, em contato direto do solo, é composto pela camada de piso apilado de 0,25m e uma camada de 0,20m de cimento queimado nas áreas comuns e revestimento cerâmico nas áreas molhadas, banheiro e cozinha, tendo uma espessura total de 0,27m. Em termos de propriedades térmicas, o piso tem uma transmitância térmica de 1,59 W/m².K e capacidade térmica igual a 394,3 kJ/m².K (Tabela 43).

Tabela 43 – Propriedades térmicas do piso.

Parâmetros	Unidades	Propriedades térmicas
e	m	0,27
Contato externo com o solo	-	sim
U	m ² .K	1,59
CT	kJ/m ² .K	394,3
Emissividade	-	Contrapiso “Very Rough” - checar valor no E+

As **paredes** do tipo A são compostas de tijolos cerâmicos com espessura de 0,14m e rebocadas com argamassa de cimento de 0,015cm em ambas as faces, com espessura total de 0,17m, apresentando uma moderada $U = 2,22 \text{ m}^2.\text{K}$ e elevada $CT = 144,62 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. As paredes do tipo

B são compostas de blocos de adobe, rebocadas com argamassas de cal, apresentando as mesmas espessuras que o modelo A, apresentando $U = 2,54 \text{ m}^2.\text{K}$, similar ao modelo A e $CT = 277,76 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$, mais elevada que o modelo A (Figura 147 e Figura 148).

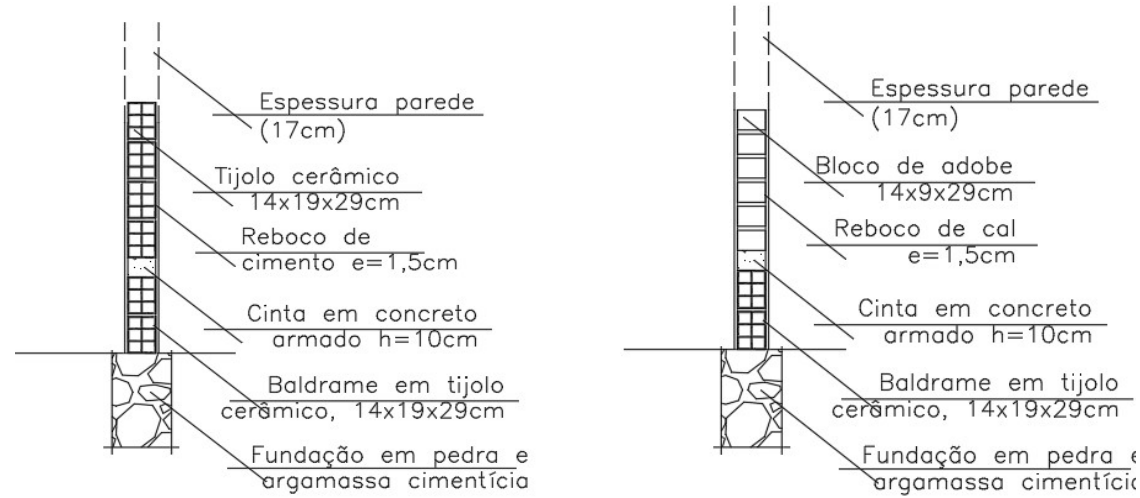


Figura 147 – Detalhe construtivo parede tipo A. Figura 148 – Detalhe construtivo parede tipo B.

Ambos os modelos atendem às recomendações quanto à **transmitância térmica** (U), considerando $\alpha = 0,2$ devido à pintura externa, à base de cal. No caso da **capacidade térmica**, ambos os modelos atendem às recomendações normativas. A alvenaria de adobe, no caso, apresenta valores de capacidade térmica muito elevados, $CT = 277,76 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e o tijolo cerâmico de $144,62 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. Essa propriedade permite uma maior inércia térmica, isto é, um amortecimento do calor diurno e um aquecimento do edifício no período noturno (

Tabela 44 e

Tabela 45).

Tabela 44 – Propriedades térmicas das paredes.

Propriedade	Unidade	Alvenaria em adobe	Alvenaria em tijolo cerâmico
e	m	0,17	0,17
α	-	0,2	0,2

U	m ² .K	2,54	2,22
CT	kJ/m ² .K	277,76	144,62

Tabela 45 – Parâmetros NBR 15575.

Zona 5		Zona 7 e 8	
$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$ FV

As **coberturas** dos tipos A e B seguiram o modelo PMCMV tipologia 1, pois o intuito foi compreender a influência dos materiais das paredes sobre o modelo. Ambos os modelos foram construídos com o mesmo material: telha cerâmica sem forro com $\alpha = 0,75$; $U = 4,55$ m².K e $CT = 18$ kJ/m².K. A NBR 15220 aponta valores de transmitância distintos, a depender do valor da absorptância. Porém, mesmo com $\alpha \leq 0,4$, o valor da cobertura não atende às recomendações de $U \leq 2,3$ m².K (Tabela 46).

Tabela 46 – Propriedades térmicas da cobertura.

		Telha cerâmica	Parâmetros NBR 15575	
e	m	0,03	Sem recomendações	
α	-	0,75	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
U	m ² .K	4,55	$U \leq 2,3$ FV	$U \leq 1,5$ FV
CT	kJ/m ² .K	144,62	Sem recomendações	

5.2.5. JANELAS E INFILTRAÇÃO DE AR

As janelas foram analisadas a partir dos seguintes parâmetros: percentual das janelas nas fachadas, transmitância térmica, transmitância, absorptância e refletância à radiação solar, proteções solares externas e internas e taxa de infiltração horária. O percentual de janela nas fachadas apresenta um pequeno valor de 8%, o que significa que a janela, como material de envoltória, tem pouca representatividade no modelo. Quanto à propriedade térmica, verifica-se uma transmitância de 8,5 W/m².K. Transmitância, absorptância e refletância à radiação solar mostram-se com 70%. Quanto às proteções solares, o modelo apresenta um beiral de 1,00m e duas varandas de 1,71m na fachada frontal e fundos. Por fim, a taxa de infiltração horária, considerada de 1 ach, valor mínimo recomendado pela NBR 15575, quando as esquadrias se encontram fechadas (Tabela 47).

Tabela 47 – Parâmetros térmicos para as janelas e infiltração de ar

Parâmetros		
Janelas	Percentual de janela nas fachadas	8%
	Transmitância térmica	8,5 W/m ² .K
	Transmitância, absorvância e reflectância à radiação solar	70%
	Proteções solares externas e internas	1m de beiral
Infiltração de ar	Taxa de infiltração horária	1 ach

5.2.6. ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E PESSOAS

Considerando a tipologia residencial e as quantidades de pessoas habitantes, foram definidos padrões de ocupação, padrão de uso, padrão de iluminação, cargas internas e equipamentos a partir das recomendações do regulamento RTQ-R.

Embora a habitação rural tenha uma ocupação diferenciada do padrão urbano, não foram identificados trabalhos na literatura que dissertem com profundidade sobre o tema, de modo a definir um padrão. Assim, optou-se pelo padrão de ocupação e taxa metabólica em função das atividades dos usuários apresentados pelo RTQ-R (Eletrobras/Procel and CB3E, 2012). No caso deste modelo com 3 quartos, considerou-se uma casa com o total de 6 pessoas, distribuídas em 2 pessoas por dormitório.

O **padrão de ocupação RTQ-R** é definido da seguinte maneira:

- i) Os dormitórios devem apresentar o padrão mínimo de duas pessoas por ambiente;
- ii) A sala deve ser utilizada por todos os usuários do dormitório;
- iii) No caso da existência de mais um cômodo de permanência prolongada não deve ser a sala (a população descrita na coluna sala pode ser distribuída entre esses ambientes).
- iv) Em termos de horários, os dormitórios na semana são ocupados das 21h às 7h com 6 usuários. No final de semana das 21h às 10h, com 6 dos usuários. Já a sala tem seu uso das 14h às 21h, variando a quantidade de pessoas de 2 a 6. No final de semana, a ocupação varia de 11 às 21h, e a quantidade de pessoas vai de 2 a 4 (Figura 149).

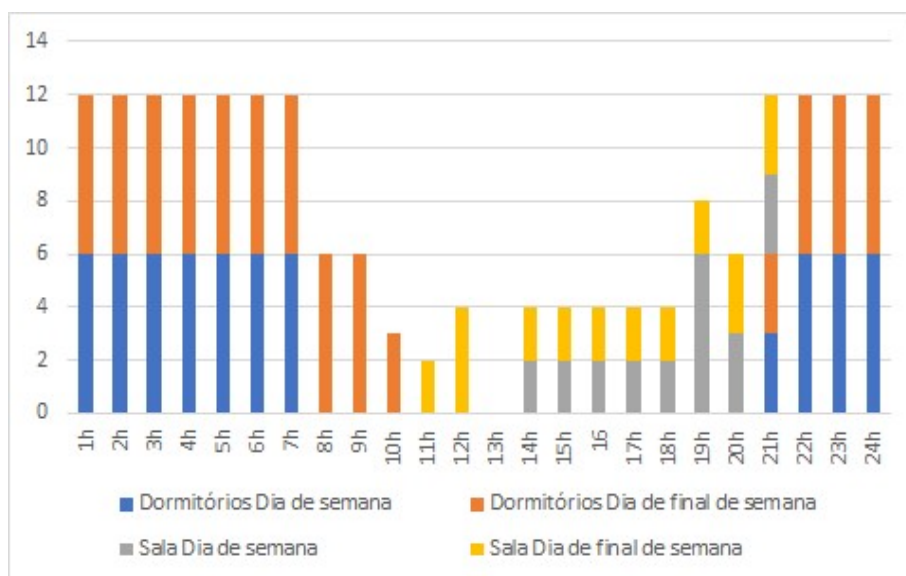


Figura 149 – Padrão de ocupação.

A **taxa metabólica** adotada em função da atividade desempenhada em cada ambiente se baseou nos parâmetros dos padrões de ocupação RTQ-R para cada ambiente de permanência (Eletrobras/Procel and CB3E, 2012). No ambiente sala adotou-se 60w de calor produzido e 108W/m² de calor produzido para área de pele, isto considerando o usuário sentado ou assistindo TV. Para os dormitórios adotou-se 45w de calor produzido e 41W/m² de calor produzido para área de pele, considerando os usuários dormindo ou descansando (Tabela 48).

Tabela 48– Taxas metabólicas para cada atividade.

Ambiente	Atividade realizada	Calor produzido	
		W	Calor produzido para área de pele = 1,80 m ² W/m2
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	41

Considerando o padrão de ocupação estabelecido anteriormente, foram definidos dois **padrões de uso de iluminação**: um para os dias de semana e outro para os finais de semana, que variam entre 0%, quando a iluminação está desligada, ou 100%, quando está ligada. Assim, no período em que não havia ocupação no ambiente, considerou-se desligada; e quando há ocupação, considerou-se iluminação ativa (Figura 150 e Tabela 49).

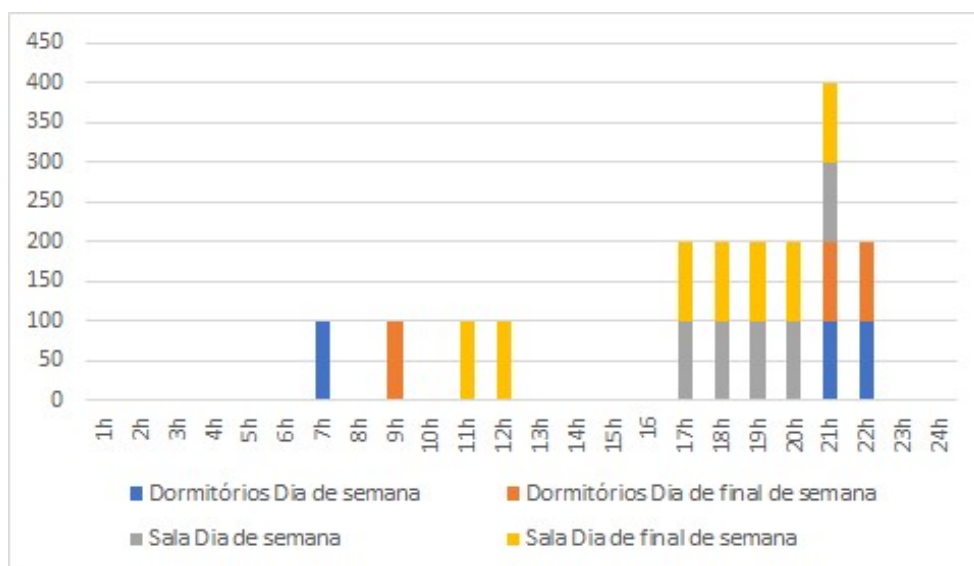


Figura 150 – Padrão de uso da iluminação.

Tabela 49–Densidade de potência instalada de iluminação.

Ambiente	DPI
	(W/m ²)
Dormitórios	5,0
Sala	6,0

As **cargas internas de equipamentos** foram modeladas unicamente para a sala conforme recomenda a RTQ-R (2012) (Eletrobras/Procel and CB3E 2012). O período e a potência das cargas internas são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Cargas internas de equipamentos.

Ambiente	Período	Potência
		W/m ²
Sala	24h	1,5

5.2.7. ESTRUTURA DO MODELO

De modo a compreender a estrutura do modelo, foi desenvolvida a tabela abaixo, que reúne, de forma resumida, informação em dados numéricos, relativa às tipologias arquitetônicas, orientação, envoltória, infiltração de ar, piso e janelas (Tabela 51).

Tabela 51– Estrutura do modelo térmico

Tipologias arquitetônicas	Pavimento	1	
	Cômodos	5	
	Área	75m ²	
	Distribuição espacial	Rural	
Orientação	Azimute	0, 90, 180, 270°	
Paredes (interna e externa)	Modelos	Tijolo cerâmico	Adobe
	Espessura	0,17m	0,17 m
	Transmitância térmica	2,22 m ² .K	2,54 m ² .K
	Capacidade térmica	144,62 kJ/m ² .K	277,76 kJ/m ² .K
	Absortância à radiação solar	0,2	0,2
Cobertura	Espessura	0,03m	
	Transmitância térmica	4,55 W/m ² .K	
	Capacidade térmica	18 kJ/m ² .K	
	Absortância à radiação solar	0,75	
Infiltração de ar	infiltração de ar	1	
Piso	Dimensões	e = 0,27m	
	Contato externo com o solo	sim	
	Transmitância térmica	1,59 W/m ² .K	
	Capacidade térmica	394,3 kJ/m ² .K	
Janelas	Percentual de janela nas fachadas	8%	
	Transmitância térmica	8,5 W/m ² .K	
	Transmitância, absortância e refletância à radiação solar	70%	
	Proteções solares externas e internas	1m de beiral	

6. ANÁLISE TÉRMICA DO MODELO EM ALVENARIA CERÂMICA E ADOBE

Os modelos em alvenaria de tijolo cerâmico e adobe foram analisados a partir do comportamento dos seus cômodos de permanência: sala/cozinha e 3 quartos em 4 orientações distintas: norte, sul, leste e oeste. Foram também verificados seus comportamentos em três cenários distintos: as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, representadas pelas cidades de Guaramiranga, Crateús e Fortaleza, respectivamente.

A análise entre os modelos foi realizada a partir de 3 variáveis: **área da envoltória dos cômodos, orientação e tipologias de paredes:**

- Para a área dos cômodos considerou-se a área das paredes externas e internas e cobertura de cada cômodo e sua influência sobre o percentual de conforto.
- Na variável orientação, considerou-se a rotação do modelo a cada 90°, gerando posições com Az0, Az90, Az180 e Az270.
- Por fim, houve a análise detalhada de tipologia de paredes.

De modo a analisarmos a influência das variações dos tipos de paredes, optamos por levantar as dimensões de área das paredes interna e externa, cobertura e envoltória para cada cômodo, de modo a se compreender a influência das mesmas nas diferentes zonas climáticas. Este tipo de análise partiu das pesquisas de (DESOGUS et al, 2014), que aponta para forte influência da cobertura sobre as edificações residenciais, se comparadas com as paredes. A pesquisa de Parra-Salvador et Batty (2006), que aponta que as paredes internas de uma habitação em adobe tem uma relativa influência sobre o comportamento da edificação (PARRA-SALDIVAR and BATTY, 2006). Considerando as questões acima, construímos um quadro com a área de parede interna e externa, cobertura e envoltória para cada cômodo, a fim de compreender a influência das mesmas nas diferentes zonas climáticas (Tabela 52 e Figura 151).

Tabela 52 – Área dos componentes da envoltória e paredes internas.

Ambientes	Parede interna	Parede Externa	Coberturas	Aberturas	Envoltória
Sala/ cozinha	38,52 m ²	38,73 m ²	29,66m ²	6,5 m ²	68,39 m ²
Quarto 01	18 m ²	16 m ²	8,6 m ²	1,1 m ²	24,6 m ²
Quarto 01	28,2 m ²	6,35 m ²	8,6 m ²	1,1 m ²	14,95 m ²
Quarto 03	22,16 m ²	19,2 m ²	8,6 m ²	1,1 m ²	27,8 m ²
Total	106,88 m ²	80,28 m ²	55,66 m ²	9,8 m ²	252,62 m ²

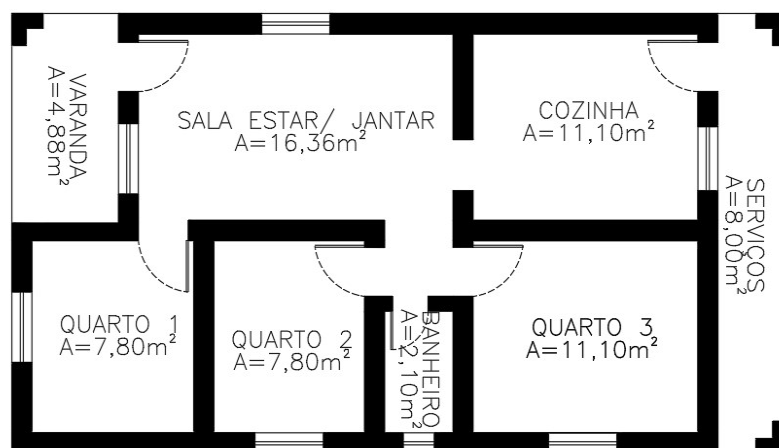


Figura 151 – Planta baixa modelo PMCMV.

As análises foram realizadas considerando o percentual de horas de conforto e desconforto por frio e calor, a partir dos critérios estabelecidos pela ASHRAE Standart 55 (2004). Assim como foram considerados os critérios da NBR 15575-5 para avaliar o comportamento dos dias de temperaturas extremas anuais.

A partir da ASHRAE Standart 55 (2004), foi determinada a temperatura operativa neutra (T_{on}) e a zona de conforto de cada ZB, cuja zona de conforto é a soma de $\pm 2,5$ °C à temperatura operativa neutra, representando nesse intervalo a satisfação de 90% dos usuários, baseando-se em Dear et al (1997). A zona de conforto é compreendida como uma faixa de temperaturas onde os usuários não preferam nem mais calor ou mais frio. Abaixo segue a fórmula para se calcular a temperatura neutra (T_{on}).

$$T_{on} = 17,8 + 0,32 \, t_m \quad (1)$$

Onde: T_{on} : Temperatura Operativa Neutra °C

tmm: Temperatura média mensal do ar externo °C

A zona de conforto é o intervalo entre limite superior: $T_{on} + 2,5^{\circ}C$ e limite inferior: $T_{on} - 2,5^{\circ}C$, em que a temperatura interna estará em conforto estando dentro dos limites, em desconforto por calor se estiver acima e em desconforto por frio se estiver abaixo. Assim, a cada mês há uma zona de conforto para cada zona bioclimática, e a partir dessa diferença são calculados os percentuais de conforto e desconforto anuais. A zona bioclimática 5, por possuir temperaturas mais baixas e elevadas amplitudes ao longo ano, apresenta uma média de 22,15 e 27,15°C entre os seus limites inferior e superior, enquanto as zonas bioclimáticas 7 e 8 apresentam limites muito similares, apesar de possuírem climas diferentes. A zona 7 detém amplitudes térmica e temperaturas elevadas, fazendo com que sua média mensal se aproxime da zona bioclimática 8, que por sua vez apresenta temperaturas mais amenas e baixas amplitudes térmicas (Tabela 53).

Tabela 53 – Temperatura limite superior e inferior.

	Zona 5	Zona 7	Zona 8
Limite Inferior	22,15 °C	23,97 °C	23,83 °C
Limite Superior	27,15 °C	28,97 °C	28,83 °C

Ao analisar o comportamento anual das temperaturas externas de cada cidade em relação à zona de conforto verifica-se o seguinte (Figura 152):

- Na zona bioclimática 5, apesar de apresentar temperaturas elevadas, permanece no período diurno dentro da zona de conforto e no período noturno na zona desconforto por frio.
- A zona 7, por sua vez, apresenta temperaturas diurnas acima da zona de conforto e noturnas abaixo da zona de conforto com valores elevados de temperatura para cima ou para baixo.
- A zona 8, apresenta o desconforto por frio e calor, mas com picos menores de temperatura.

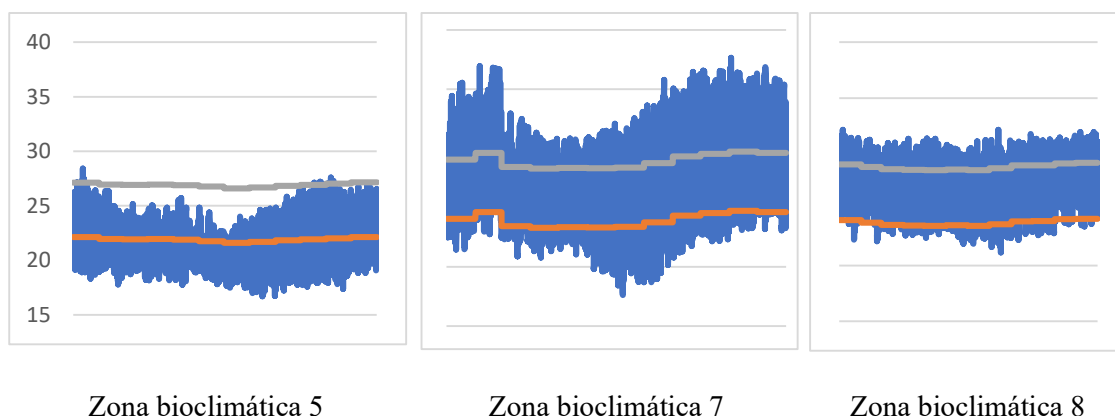


Figura 152 – Temperatura limite e zona de conforto e desconforto para as ZBs 5, 7 e 8.

A partir do comportamento das temperaturas externas de cada clima perante as devidas zonas de conforto, foi avaliado o percentual de conforto para cada zona (Figura 153):

- Ao considerar os percentuais de conforto e desconforto do clima externo das 3 zonas bioclimáticas do Ceará, verificou-se que o clima da cidade de Guaramiranga, na zona bioclimática 5, foi aquela que apresentou o menor percentual de conforto e o maior desconforto por frio.
- A cidade de Crateús, situada na zona bioclimática 7, foi aquela que apresentou o maior desconforto por calor e um baixo desconforto por frio.
- A cidade de Fortaleza, zona 8, detém o maior percentual de conforto, apresentando um baixo desconforto por calor e um irrelevante desconforto por frio.
- Nas zonas 7 e 8 o desconforto por frio é irrelevante durante o ano inteiro, por serem climas com temperaturas elevadas.

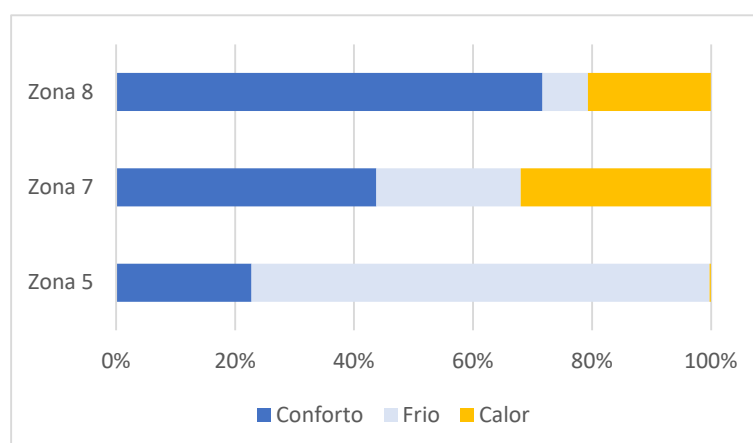


Figura 153 - Conforto e desconforto para frio ou calor para as zonas bioclimática 5, 7 e 8.

6.1. TIPOS DE PAREDES

Por conta dos tipos de paredes apresentarem variações mais relevantes que as demais variáveis como orientação e dimensão dos cômodos, realizou-se uma análise específica para cada zona bioclimática.

6.1.1. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

O modelo situado na cidade de Guaramiranga, zona bioclimática 5, apresenta o menor percentual de conforto se comparada às outras zonas, com uma média anual de 23% para o adobe e 28% para o tijolo cerâmico. Nessa zona, o modelo revela um elevado desconforto por frio o ano inteiro, com médias de 76% para o adobe e 68% para o tijolo cerâmico, e um baixo desconforto por calor, com uma média anual de 1% para o adobe e 4% para o tijolo cerâmico. Em termos de estações, verifica-se uma variação irrelevante entre elas, seja por conforto ou desconforto. Isso ocorre pelo fato de ser um clima tropical com pequenas variações de temperatura e umidade. As temperaturas máximas mensais variam de 24 a 28°C e mínimas de 16,72 e 18,85°C. Já as umidades apresentam médias mensais quase constantes, de 82,83 a 93,7% (Figura 154 e Tabela 54).

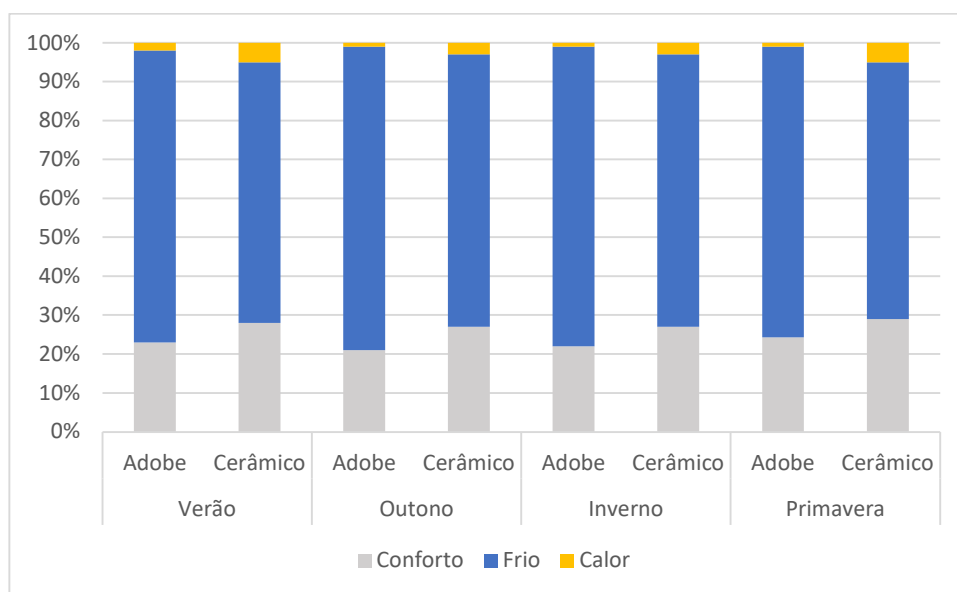


Figura 154 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico.

Tabela 54 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico.

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico
Conf	23%	28%	21%	27%	22%	27%	24%	29%
Frio	75%	67%	78%	70%	77%	70%	74%	66%
Calor	2%	5%	1%	3%	1%	3%	1%	5%

O frio é preponderante dentro do modelo devido ao clima de Guaramiranga apresentar temperaturas abaixo da zona de conforto, principalmente no período noturno. Por sua vez, o baixo percentual de desconforto por calor se deve ao fato de o clima apresentar temperaturas amenas no período diurno, dentro dos limites de conforto, e baixas no período noturno. Além disso, o modelo não apresenta coberturas adequadas para clima, com telha cerâmica com $U = 4,55 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$, pois a NBR 15520 recomenda o uso de coberturas com $U \leq 1,5 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. As coberturas utilizadas provocam rápidas trocas de calor diurno e noturno. Porém, o uso de paredes de adobe e tijolo cerâmico, com moderada capacidade e transmitância térmica, adobe com $CT = 277,76 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e $U = 2,54 \text{ m}^2.\text{K}$ e tijolo cerâmico com $CT = 144,62 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e $U = 2,22 \text{ m}^2.\text{K}$, se enquadram nas normativas e permitem uma acumulação de calor diurno e liberação de calor noturno, elevando as temperaturas neste período. As coberturas sem forro contribuem para o modelo atingir a temperatura de conforto em um curto período de horas durante o dia. No entanto, durante a noite, as perdas de calor pela cobertura reduzem a eficiência das paredes em liberar calor (Figura 155).

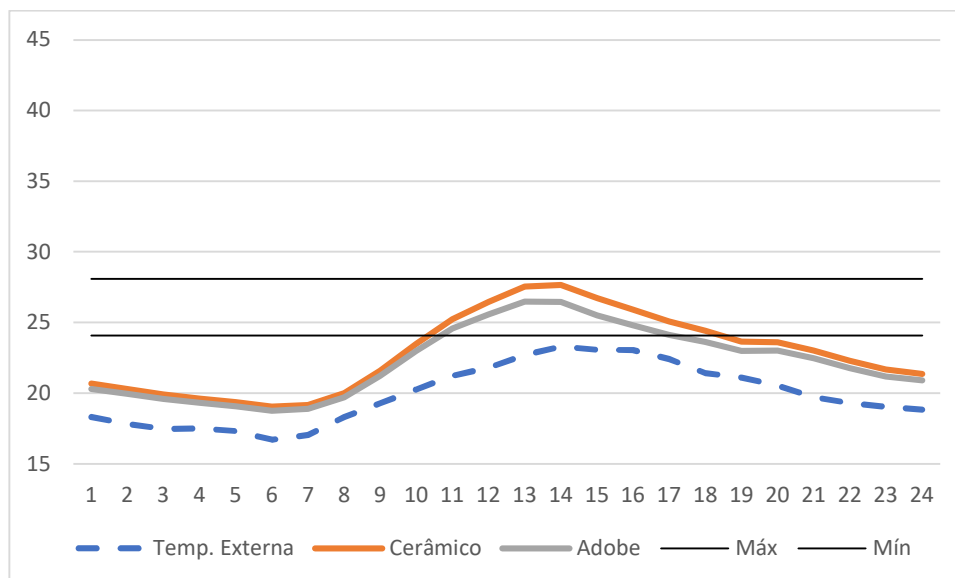


Figura 155 – Temperatura horária do dia 15 de agosto, dia típico de inverno.

Como verificado, o modelo com alvenaria em tijolo cerâmico detém o maior percentual de conforto se comparado ao modelo em adobe, apesar de ser uma diferença baixa, de 5 a 6%. Também se constata que apresenta o menor desconforto por frio, com uma diferença entre os modelos varia de 7 a 8%, a depender da estação. Esse fenômeno se deve ao fato de que ambos os modelos apresentarem uma transmitância térmica muito aproximada, 2,22 e 2,54 kJ/m².K, tijolo cerâmico e adobe, respetivamente. O que as diferencia é a capacidade térmica. A alvenaria cerâmica detém uma capacidade térmica mais baixa, com valor de 144,62 kJ/m².K, o que permite trocas térmicas mais rápidas, isto é, um maior aquecimento diurno, reduzindo parcialmente o desconforto por calor. Já o adobe, por ter uma elevada capacidade térmica de 277,76 m².K, permite um maior atraso térmico, consequentemente oferece temperaturas mais frias durante o dia e mais elevadas durante a noite. Porém, o aumento das temperaturas noturnas não provoca a redução do desconforto.

6.1.2. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

O modelo situado na cidade de Crateús, zona bioclimática 7, apresenta um baixo percentual de conforto, com uma média anual de 46% para o adobe e 40% para o tijolo cerâmico. Nesta zona, o modelo apresenta um elevado desconforto por calor o ano inteiro, com médias de 52% para o adobe e 59% para o tijolo cerâmico e um baixo desconforto por frio, como média a anual de 2% para o adobe e 1% para o tijolo cerâmico (Figura 156 e Tabela 55). O calor é preponderante dentro do modelo devido às características climáticas da cidade: temperaturas máximas mensais apresentam valores mínimos no inverno de 30,85 °C e máximos na primavera de 37,67 °C, combinadas com uma baixa umidade, com médias mensais variando entre 46,7%, nos períodos secos, e 84,3% nos chuvosos.

Em termos de estações, verifica-se uma moderada variação do conforto com a diferença de 20% entre a estação mais quente, a primavera, e a mais fria, outono. Isso ocorre pela alta variação de umidade nas estações. O período mais frio corresponde ao período chuvoso entre outono e inverno; e o mais quente, ao período de estiagem, com baixo teor de umidade atrelado a elevadas temperaturas.

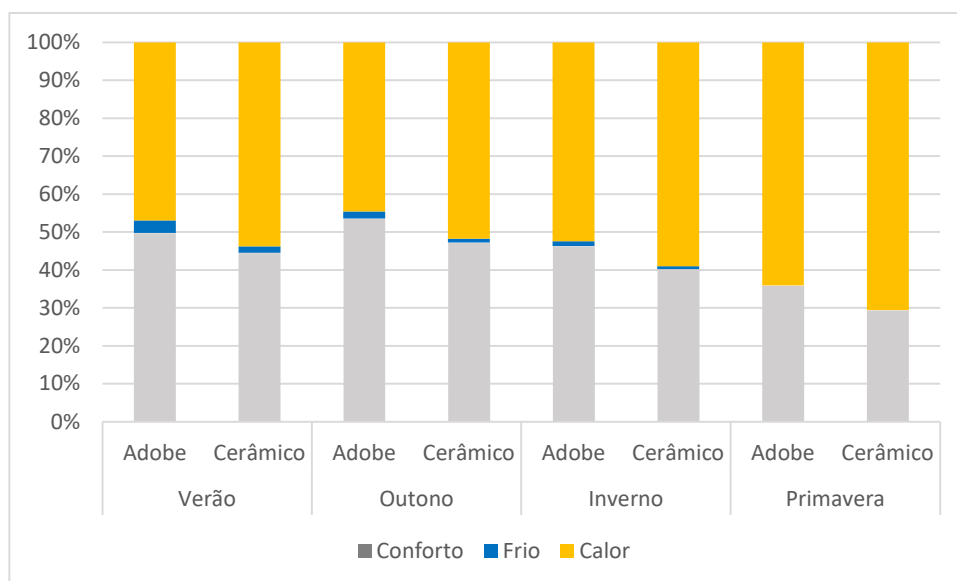


Figura 156 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 7.

Tabela 55 - Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 7.

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico
Conforto	50%	45%	54%	47%	46%	40%	36%	29%
Frio	3%	2%	2%	1%	1%	1%	0%	0%
Calor	47%	54%	45%	52%	52%	59%	64%	71%

O calor é preponderante dentro do modelo devido ao clima de Crateús apresentar temperaturas acima da zona de conforto, principalmente no período diurno. Por sua vez, o baixo percentual de desconforto por frio se deve ao fato de o clima ter temperaturas elevadas o ano inteiro, mostrando, por vezes, no período noturno, algumas horas de temperatura abaixo da zona de conforto. Além disso, o modelo não apresenta coberturas adequadas para o clima, com telha cerâmica com $U = 4,55 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ sem ventilação, quando a NBR 15520 recomenda o uso de coberturas com $U \leq 1,5 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ com ático ventilado. Alguns autores como Lima and Ribeiro (2009) e Medeiros, Carlos, & Elali, (2011) indicam o uso de coberturas com alta inércia térmica e com baixa transmitância, como lajes e coberturas verdes. Outros autores, como (PAULA, 2017) apontam para o uso de coberturas em forros com laje isolada com $U \leq 0,5 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$.

As coberturas utilizadas provocam rápidas trocas de calor, estimulando um aquecimento diurno e um resfriamento noturno. O uso de paredes de adobe e tijolo cerâmico com moderada

capacidade e transmitância térmica, adobe com $CT = 277,76 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e $U = 2,54 \text{ m}^2.\text{K}$ e tijolo cerâmico com $CT = 144,62 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e $U = 2,22 \text{ m}^2.\text{K}$, contribuem para o aquecimento noturno, gerando temperaturas internas mais elevadas que as temperaturas externas, que ainda se enquadram na zona de conforto, devido à moderada amplitude térmica de Crateús como pode se observar em um dia típico de inverno (Figura 157).

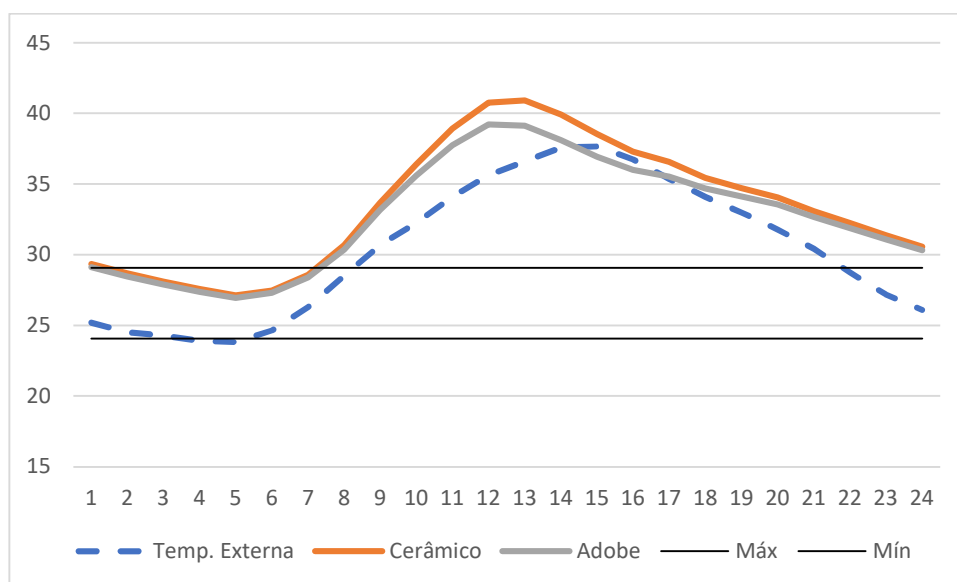


Figura 157 – Temperatura horária do dia 2 de novembro, dia típico de primavera.

Como verificado, o modelo com alvenaria em adobe detém o maior percentual de conforto, se comparado ao modelo em tijolo cerâmico, apesar de ser uma diferença baixa, de 5 a 6%. Além disso, apresenta o maior desconforto por calor, cuja diferença entre os modelos varia de 6 a 7%, a depender da estação.

Este fenômeno se deve ao fato de que ambos os modelos apresentam transmitância térmica muito aproximada, de 2,22 e 2,54 $\text{kJ/m}^2.\text{K}$, para tijolo cerâmico e adobe, respectivamente; o que diferencia ambas é a capacidade térmica. A alvenaria cerâmica detém capacidade térmica mais baixa com valor de 144,62 $\text{kJ/m}^2.\text{K}$, o que permite trocas térmicas mais rápidas, isto é, um maior aquecimento diurno, aumentando parcialmente o desconforto por calor. Já o adobe, por uma elevada capacidade térmica de 277,76 $\text{m}^2.\text{K}$, permite um maior atraso térmico, consequentemente temperaturas mais frias durante o dia e mais elevadas durante a noite. Porém, o efeito de redução das temperaturas diurnas é anulado pelo aquecimento gerado pela cobertura, não permitindo condições de conforto em nenhum modelo.

6.1.3. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

Ambos os modelos, tijolo cerâmico e adobe, apresentam as melhores condições de conforto na cidade de Fortaleza, zona bioclimática 8, com uma média anual de 65% para o adobe e 55% para o tijolo cerâmico. Nessa zona, o modelo apresenta um moderado desconforto por calor o ano inteiro, com médias de 34% para o adobe e 44% para o tijolo cerâmico. E um desconforto por frio irrelevante, com média anual de 1% para o adobe e o tijolo cerâmico, como ocorre na zona 7. O calor é preponderante dentro do modelo, devido às características climáticas da cidade. A cidade apresenta um clima com temperaturas amenas o ano inteiro, temperatura anual mínima de 21,18°C e máxima de 32,18°C. A taxa de umidade mensal é elevada, variando de 80,06% a 89,72%. Em termos de estações, verifica-se uma moderada variação do conforto com a diferença irrelevante de 7% entre a estação mais quente, o verão, e a mais fria, o outono. Isso ocorre pelo fato de o clima apresentar baixa variação de umidade e temperatura ao longo do ano (Figura 158 e Tabela 57).

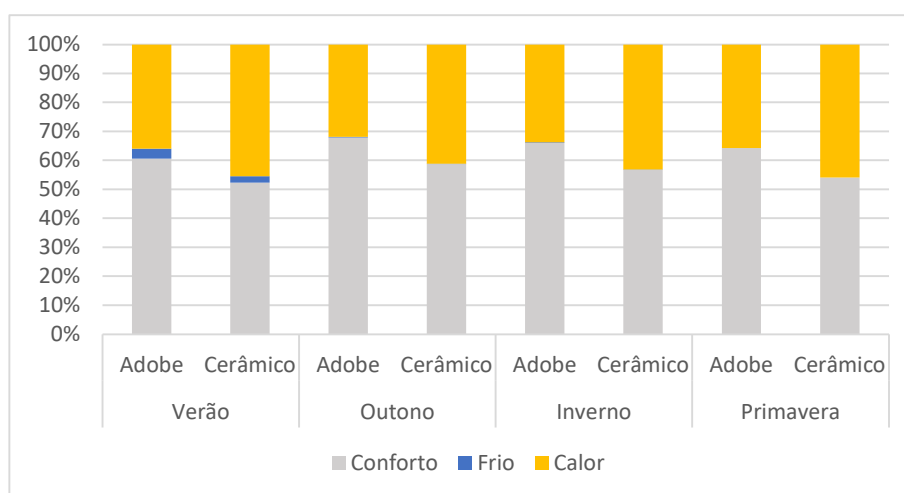


Figura 158 – Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 7.

Tabela 57 - Conforto e desconforto por frio e calor por estações dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 7.

	Verão		Outono		Inverno		Primavera	
	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico
Conforto	61%	52%	68%	59%	66%	57%	64%	54%
Frio	3%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Calor	36%	45%	32%	41%	34%	43%	36%	46%

Como verificado, o modelo com alvenaria em adobe detém o maior percentual de conforto, se comparado ao modelo em tijolo cerâmico, apesar de ser uma diferença baixa, 9%. Além disso, apresenta o maior desconforto por calor, cuja diferença entre os modelos varia de 9 a 10%, a depender da estação. Esse fenômeno se deve ao fato de que ambos os modelos apresentam transmitância térmica muito aproximada de 2,22 e 2,54 $\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$, tijolo cerâmico e adobe, respectivamente, o que as diferencia é a capacidade térmica. A alvenaria cerâmica detém capacidade térmica mais baixa com valor de 144,62 $\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$, o que permite trocas térmicas mais rápidas, isto é, um maior aquecimento diurno e aumento parcial do desconforto por calor. Por sua vez, o adobe, por ter uma elevada capacidade térmica de 277,76 $\text{m}^2\cdot\text{K}$, permite um maior atraso térmico, consequentemente temperaturas mais frias durante o dia e mais elevadas durante a noite. Porém, o efeito de redução das temperaturas diurnas é anulado pelo aquecimento gerado pela cobertura, não permitindo condições de conforto em nenhum modelo (Figura 159).

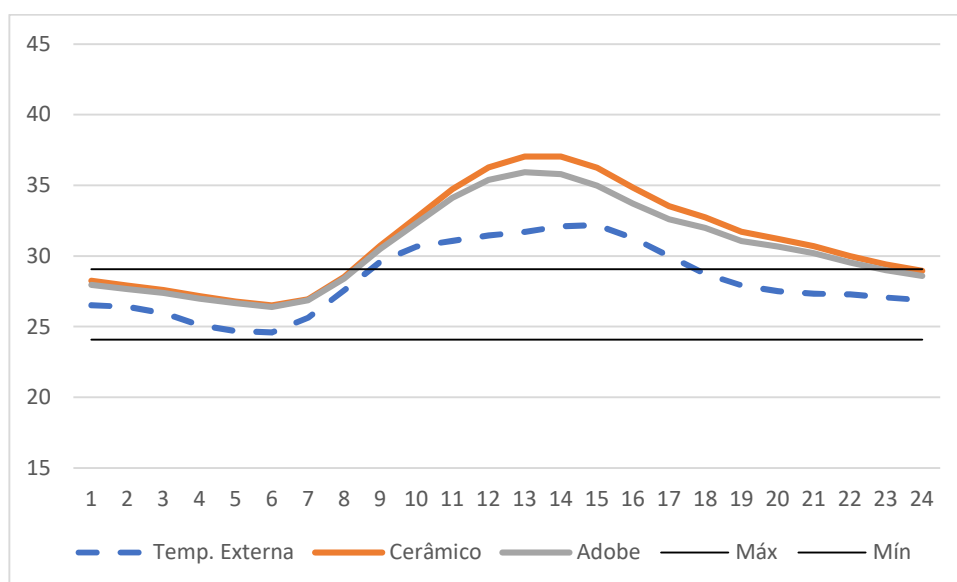


Figura 159 – Temperatura horária do dia 2 de novembro, dia típico de primavera.

6.1.4. SÍNTESE

Conclui-se que a variação das paredes tem um baixo impacto sobre o conforto em qualquer uma das zonas. Esta análise permitiu aferir o seguinte:

- As zonas bioclimáticas 5 e 7 apresentam variações de baixa diferença entre as paredes de adobe ou tijolo cerâmico, variando entre 5 a 6% no percentual de conforto, isto considerando que na zona 5 o adobe apresenta a maior diferença e na zona 7, invertem-se os resultados.

- Já na zona 8 a diferença entre percentual de conforto do adobe e do tijolo cerâmico pode chegar a 10%.
- O desconforto por calor tem valores similares ao conforto para as zonas 7 e 8, mas de forma invertida, a alvenaria de tijolo cerâmico sempre apresenta o maior desconforto.
- O desconforto por frio tem maior relevância na zona 5, variando entre 7 e 8%. Nas demais zonas, a diferença entre os modelos é irrelevante (Tabela 56).

Tabela 56 - Conforto e desconforto por frio e calor dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para cidade de Crateús, Zona bioclimática 5, 7 e 8.

	Zona 5	Zona 7	Zona 8
Conforto	5 a 6%	-6 a 5%	-10 a -9%
Desconforto por frio	-8 a -7%	0 a -2%	0 a 1%
Desconforto por calor	4 a 2%	6 a 7%	a 10%

6.2. ÁREA DOS CÔMODOS

Ao avaliarmos a influência da variação da área dos cômodos, verificamos que também há uma baixa influência no percentual de conforto da edificação. A diferença entre os cômodos varia de 2 a 5%, dependendo da orientação ou do tipo de parede. A variação da orientação foi feita variando o azimute a cada 90°, cada modelo apresentou 4 orientações Az0, Az90, Az180 e Az270.

O cômodo que apresenta melhores condições de conforto é a sala, assim como o menor desconforto por frio. Este facto pode ser justificado porque a sala apresenta uma maior área de superfície exposta ao sol com 68,39m², o que representa 27% de toda a área da envoltória, isso faz com que esse cômodo receba mais insolação que os demais ambientes. Desse modo, elevam-se as temperaturas e se reduz o desconforto por frio.

No caso das zonas 7 e 8, por serem cidades com temperaturas diárias mais elevadas, a variação das áreas dos cômodos tem uma influência um pouco maior, de 5 a 11% para a zona 7 e 5 a 8% para zona 8. Por outro lado, a sala de estar apresenta o pior percentual de conforto e o maior desconforto por calor, pelo fato de acumular mais calor (Tabela 57).

Tabela 57 - Diferença entre o percentual de conforto máximo e mínimo quando se variam os cômodos.

	ZONA 05		ZONA 07		ZONA 08	
	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe	Cerâmico	Adobe
Az0	5%	4%	11%	6%	7%	9%
Az90	6%	4%	9%	5%	8%	9%
Az180	2%	3%	11%	7%	5%	6%
Az270	4%	3%	13%	8%	6%	7%

6.3. ORIENTAÇÃO

Em termos de orientação, a influência é mínima e irrelevante, variando em 1 a 2%. Esse fenômeno pode ser explicado através das pesquisas de (DESOGUS et al. 2014) e (CHVATAL 2014), que apontam que as coberturas têm maior impacto nas trocas de calor do que as paredes, por passarem mais tempo expostas ao sol e não sofrerem influência da orientação. Além disso, há o fato dos modelos permanecerem com as esquadrias opacas fechadas, eliminando a influência da orientação dos ventos e da radiação solar direta nos ambientes.

6.4. SÍNTESE

Da análise térmica efetuada obteve-se as seguintes informações (Tabela 58):

- Todas as variáveis analisadas apresentaram baixo impacto sobre os modelos, sendo a variação das tipologias das paredes a mais relevante em termos de influência sobre o conforto.
- O modelo, seja em adobe ou alvenaria cerâmica, apresentou um percentual de conforto mensal com valores máximos de 68%, na zona 8, 54%, na zona 7 e 28% na zona 5.
- O desconforto por calor está presente nas 3 zonas e desconforto com frio é mais relevante na zona 5.
- As variáveis: orientação e cômodos se apresentaram irrelevantes, pois ao variarmos quaisquer elementos a diferença percentual de conforto foi mínima, entre 1 e 2%. A variável parede apresentou uma baixa influência, mas com um percentual um pouco maior do que as demais variáveis, apresentando percentuais de 4 a 10% entre o conforto oferecido pela alvenaria de tijolo cerâmico e adobe, a depender da zona bioclimática.

- Na zona 5, a alvenaria de tijolo cerâmico apresentou um percentual de conforto mais elevado que o adobe, pois, a alvenaria de tijolo cerâmico tem trocas de calor mais elevadas, por apresentar uma menor capacidade térmica. Nas demais zonas a diferença entre os tipos de alvenaria é irrelevante.

Tabela 58 - Conforto, desconforto por frio e calor dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para as Zonas 5, 7 e 8.

Variáveis	Zona 5	Zona 7	Zona 8
Conforto	Baixo	Moderado	Moderado
Desconforto por frio	Alto	Irrelevante	Irrelevante
Desconforto por calor	Baixo	Moderado	Moderado
Orientação	irrelevante	irrelevante	irrelevante
Cômodos	irrelevante	irrelevante	irrelevante
Paredes	Baixo	irrelevante	irrelevante

*Níveis

Irrelevante $x \leq 10\%$

Baixo $\leq 10\% x \leq 40\%$

Moderado $\leq 40\% x \leq 70\%$

Alto $\leq 40\% x \leq 70\%$

A partir destas análises, pode se definir as seguintes estratégias de intervenção:

- As zonas bioclimáticas 7 e 8 necessitam de estratégias de resfriamento, já previstos pela NBR 15220 (ABNT, 2005)
- A pesquisa de Chavtal (2014) recomenda o uso de uma envoltória com cores claras, de modo a atingir baixas absorções com $\alpha \leq 0,4$, e transmitâncias moderadas com $U \leq 2,3$ kJ/m².K, atingidas com paredes de adobe de pelo menos 17cm.
- No caso das coberturas, se faz necessário o uso de forro e ventilação no ático.
- Na zona 5, são necessárias estratégias de aquecimento, envoltória com cores mais escuras, isto é, absorções mais elevadas, $\alpha \geq 0,6$ e transmitâncias moderadas para paredes e coberturas com $U \leq 2,3$ kJ/m².K (Tabela 47). Não se recomenda ventilação para as coberturas.

- Na zona 7, alguns autores como Paula (2016) e Olartechea (2015) apontam para o uso de coberturas isoladas com $U \leq 0,8 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ enquanto a ABNT (2005) $U \leq 1,5 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$, quando a cobertura for ventilada e $\alpha \leq 0,4$.
- Na zona 8, a ABNT (2005) recomenda $U \leq 1,5 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$, quando a cobertura for ventilada e $\alpha \leq 0,4$.
- Quanto a transmitância e capacidade térmica das paredes as recomendações são similares para cada zona bioclimática. $U \leq 2,3 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e $\alpha \leq 0,6$.

Tabela 59 – Estratégias e recomendações para envoltória para as zonas 5, 7 e 8.

Variáveis	Zona 5	Zona 7	Zona 8
Estratégia	Aquecimento	Resfriamento	Resfriamento
U Cobertura	$U \leq 2,3 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$	$U \leq 0,8 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$	$U \leq 1,5 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$
U Paredes	$U \leq 2,3 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$	$U \leq 2,3 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$	$U \leq 2,3 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$
CT paredes	$CT \geq 130$	$CT \geq 130$	$CT \geq 130$
α	$\alpha > 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha > 0,6$

Posto isto, como estratégias de simulação optou-se em utilizar o modelo MCVM em adobe, por apresentar um comportamento similar ao da alvenaria de tijolo cerâmico e por vezes um pouco melhor quando aplicado nas zonas 7 e 8. Além disso, apresenta o menor custo e é uma tecnologia tradicional no estado do Ceará segundo Carvalho (2012).

Outor motivo foi também por existir uma lacuna de estudos do comportamento das edificações de adobe em climas tropicais, pois os trabalhos em sua maioria são climas semiáridos frios, nos Estados Unidos (REMPEL and REMPEL 2016) e México (PARRA-SALDIVAR and BATTY 2006), ou temperados na Europa (DESOGUS et al. 2014). No Brasil há um único estudo em um clima subtropical, o trabalho de Francisco (2011). Foram então definidos os seguintes pressupostos:

- As variáveis adotadas para as paredes foram as espessuras e cores.
- Dentro do modelo optou-se por variar os tipos de coberturas, seja os tipos de forro ou cores. A importância de variar as coberturas, se baseia nos estudos de Desogus (2014) e Chavtal (2014), que referem que as coberturas têm mais relevância no comportamento térmico que nas paredes.

- As escolhas das variáveis da envoltória se baseiam nas recomendações da ABNT (2013) como transmitância térmica (U), capacidade térmica (CT) e absorvância da envoltória (α) parâmetros recomendados pela ABNT (2013).
- As demais variáveis como orientação e tipos de cômodos, por serem irrelevantes, não foram avaliadas nesta etapa. Logo, considerou-se um único cômodo, no caso da sala de estar e a orientação Az180 (Tabela 60).

Tabela 60 - Conforto, desconforto por frio e calor dos modelos em adobe e tijolo cerâmico para as Zonas.

Componentes	Parâmetros a serem analisados	Justificativa
Paredes	Cores e espessuras	Ausência de estudos sobre o desempenho térmico da alvenaria de adobe em climas tropicais
Coberturas	Cores e tipos de forro	Tem mais relevância do que as paredes
Orientação	Única orientação = Az180	Influência irrelevante
Cômodos	Único ambiente = sala de estar	Influência irrelevante

7. DESENVOLVIMENTO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS PARA ENVOLTÓRIA

A etapa de desenvolvimento do modelo foi dividida em duas partes: análise das variáveis da envoltória e validação dos parâmetros térmicos. As análises das variáveis e dos parâmetros de conforto térmico foram desenvolvidas partindo da premissa de que as variantes do modelo devem ser submetidas aos piores cenários de orientação e tipos de cômodos, de modo a reduzir a quantidade de simulações, prevendo que o modelo, sendo validado nos piores cenários, tenderá a ser automaticamente validado em outros.

7.1. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DA ENVOLTÓRIA

As variáveis para os componentes da envoltória foram escolhidas de acordo com as recomendações da NBR 15575, com o PMCMV e aliadas às soluções construtivas em adobe do Ceará, catalogadas nos trabalhos de (PALITOT, 2007); (CARVALHO, 2012), (ALCÂNTARA et al, 2018) e (AMARAL, INGRID, and COSTA, 2019):

- A NBR 15575 aponta parâmetros somente para envoltória (parede e cobertura) e aberturas, outros componentes como pé direito, piso, geometria e orientação, não são considerados. Os parâmetros para envoltória são definidos pelas propriedades de absorvância (α), capacidade térmica (CT) e transmitância (U). Quanto às aberturas, não iremos considerá-las, devido à complexidade de suas variáveis de ventilação e o fato de a plataforma Energy Plus realizar sua análise de forma simplificada.
- O PMCMV recomenda no Nordeste o uso de cobertura de telhas cerâmicas sem forro e para o Sudeste o uso de coberturas cerâmicas ou telhas de fibro-cimento com forro PVC. Nas casas de adobe tradicionais são usadas telhas cerâmicas sem forro. Investigadores como (OLARTECHEA et al, 2015) apontam um bom desempenho térmico para habitações com forro de gesso e laje volterrana na zona bioclimática 7. No quesito paredes, o PMCMV recomenda utilizar sistemas construtivos normatizados, em caso de alvenarias, de modo que sejam sempre rebocadas. A alvenaria de adobe, dentre as técnicas tradicionais do estado, é a única normatizada apenas desde 2019.

Dentre as variáveis escolhidas para **coberturas**, optou-se por telhas cerâmicas com cores distintas, que permitem variação de sua absorvância, considerando uma variação de 0,2 a 0,9 e com parâmetros apontados pela NBR 15220. Também foram consideradas as seguintes variações dos usos de forro: sem forro, laje volterrana, gesso e PVC que, por sua vez, geram a variação da transmitância e capacidade térmica dentro dos valores esperados pela NBR 15220.

Quanto às **paredes**, escolheu-se por variar suas cores com a mesma variação de absorvância das paredes de 0,2 a 0,9. Outra variável escolhida foi as espessuras das paredes, de 0,17 a 0,48cm, que influenciam na transmitância e capacidade térmica. Não se realizou a variação do tipo de revestimento, por falta de dados das propriedades térmicas sobre argamassas de solo cimento e terra na literatura. Assim como não foram encontrados dados suficientes sobre o comportamento térmico de adobes com fibras.

Em resumo, a análise do comportamento de envoltória foi desenvolvida a partir de variáveis independentes: espessura paredes e tipos de forro e variáveis dependentes: capacidade térmica, transmitância e absorvância (ver tabela 61).

Tabela 61 – Variáveis dependentes e independentes para os modelos térmicos.

Componentes	Variáveis independentes	Variáveis dependentes
Paredes	Espessura	Transmitância e Capacidade térmica
	Cores	Absortância
Coberturas	Tipos de forro	Transmitância e Capacidade térmica
	Cores	Absortância

Ao considerarmos que as orientações e cômodos têm pouca influência sobre o modelo, optou-se por utilizar um tipo de cada para reduzir a quantidade de simulações. No caso das **orientações**, optou-se por Az180. Quanto aos **cômodos**, escolheu-se analisar sempre o desempenho do ambiente sala, por apresentar em todas as ocasiões o pior desempenho.

Realizaram-se 122 simulações com variações individuais de paredes e coberturas. Após concluídas as variações, realizaram-se duas novas simulações para cada zona bioclimática combinando as melhores soluções de paredes com as melhores soluções de cobertura.

No caso das **paredes**, optou-se por analisar espessuras para duas variações de cada tipo, utilizando-se de paredes simples e dobradas:

- As paredes simples têm espessuras de 17,0 e 25,0 cm, são compostas por blocos de 14,0 e 22,0 cm, por serem os blocos de menor e maior tamanho encontrados no Ceará. São revestidas com argamassas de cal dos dois lados com espessura de 1,5cm, por ser a argamassa recomendada por diversos pesquisadores e ainda usual no estado do Ceará.
- as paredes dobradas, com espessuras de 32,0 e 48,0cm, composta por blocos de adobe com espessura de 14,0 e 22,0 cm, argamassa de junta feita de terra e rebocadas com 1,5cm de argamassa de cal para cada lado.

Para cada variável de espessura, foram simuladas 4 variações de absortância: 0,2; 0,04; 0,075 e 0,9.

Assim, testou-se todas as variáveis em três zonas bioclimáticas distintas: 5, 7 e 8, correspondentes às cidades de Guaramiranga, Crateús e Fortaleza, gerando 12 simulações por zona e 48 no total (Tabela 62 e Figura 161).

Tabela 62 – paredes para habitações em adobe

Variável 1	Variáveis 2	Variáveis 3	Nº de simulações
Parede 17cm			12
Parede 25cm	$\alpha = 0,2; 0,4; 0,75 \text{ e } 0,9$	Zonas bioclimáticas 5, 7 e 8	12
Parede 32cm			12
Parede de 48cm			12
Total			48

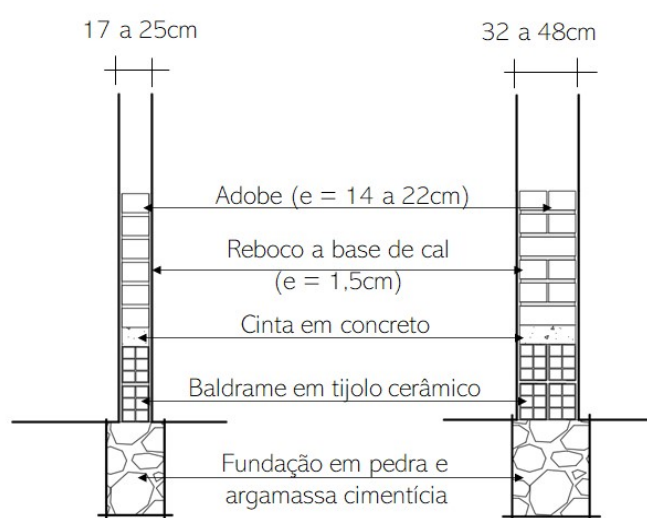


Figura 160 – paredes para habitações em adobe.

Para as **coberturas**, considerou-se quatro tipos de cobertura: sem forro, com forro de laje volaterrana, forro de gesso e forro PVC, gerando transmitância e capacidade térmica distintas. Os tipos de forro escolhidos foram aqueles usuais no PMCMV, já que as construções tradicionais se utilizam forro e apresentam variações de propriedades térmicas, gerando coberturas leves com baixa capacidade térmica ou pesadas com elevadas capacidades térmicas. Em cada tipo de cobertura foram realizadas quatro variáveis de absorvância da telha cerâmica: 0,20; 0,40; 0,75 e 0,90. Assim, testou-se todas as variáveis em três zonas bioclimáticas distintas: 5, 7 e 8, correspondentes às cidades de Guaramiranga, Crateús e Fortaleza; gerando o total de 84 de simulações para as coberturas (Tabela 63).

Tabela 63 – Coberturas para habitações em adobe

Variáveis 01	Variáveis 02	Variável 03	Variável 04	Nº de simulações
Sem forro				12
Laje volterrana				24
Forro de gesso	$\alpha = 0,2; 0,4;$	Zonas	Isolamento do	24
Forro PVC	0,75 e 0,9	bioclimáticas 5, 7 e 8	forro	24
Total				84

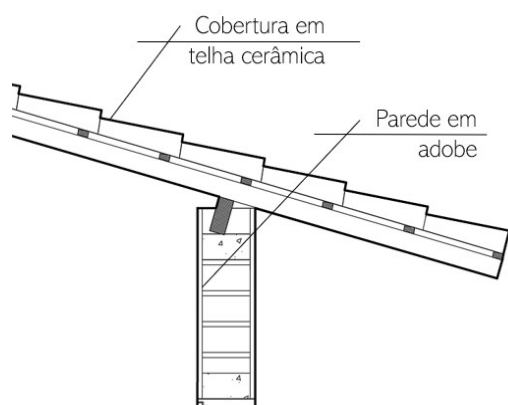


Figura 161 – Coberturas sem forro para habitações em adobe

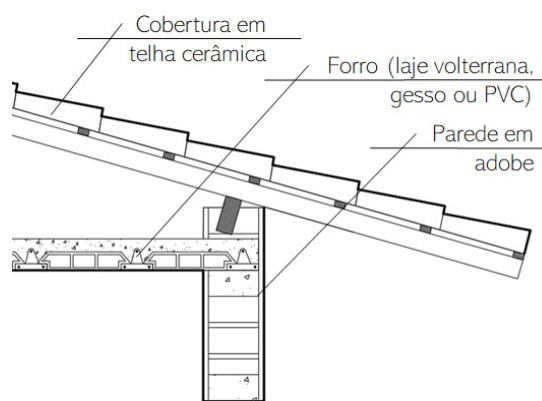


Figura 162 – Coberturas com forro para habitações em adobe

7.2. PAREDES

Neste trabalho optou-se por averiguar somente a variação espessura do bloco de uma parede revestida com cal e pintura branca a base de cal e suas cores, por ausência de dados térmicos de outros tipos de reboco e blocos com aditivos. Nesse contexto, verificou-se que:

- Quanto maior a espessura, menor a transmitância térmica, apresentando uma pequena gama de variação entre de 2,54 a 1,28 $\text{m}^2.\text{K}$.
- O inverso ocorre com a capacidade térmica, apresentando uma maior variação de 277,76 a 773,76 $\text{kJ/m}^2.\text{K}$, pois todas as paredes se enquadram na NBR 15575 com $\text{CT} \geq 130 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$.

- Porém, em termos de transmitância térmica (U), a capacidade térmica está atrelada aos valores da absorptância (α). A NBR recomenda que se $\alpha \leq 0,6$, $U \leq 3,7$ e se $\alpha \geq 0,6$, $U \leq 2,5$.

Além da variação das espessuras de paredes, realizamos também a variação do valor da absorptância do reboco em 4 valores distintos, que variam de 0,2 a 0,9, considerando os critérios da NBR 15220 para os valores mais baixos e mais alto que uma pintura sobre uma parede pode apresentar (Tabela 64).

Tabela 64 - Propriedades térmicas das paredes de adobe.

Propriedades térmicas	Unidade	Espessura 17cm	Espessura 25cm	Espessura 32cm	Espessura 48cm
ebloco	m	0,14	0,22	0,29	0,45
eparede	m	0,17	0,25	0,32	0,48
U	m ² .K	2,53	2,02	1,75	1,37
CT	kJ/m ² .K	278	406	504	710
ω	horas	4,98	7,29	9,14	12,88
α	-	0,2 a 0,9	0,2 a 0,9	0,2 a 0,9	0,2 a 0,9

7.2.1. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

Ao realizarmos a variação da absorptância e das espessuras, verificamos que quanto maior a absorptância, maior é o conforto e maior a influência da espessura na variação do percentual de conforto:

- As absorptâncias elevadas são obtidas pela pigmentação das superfícies com cores escuras. No caso: quanto maior o valor da absorptância de uma superfície, maior é sua absorção de calor. O fenômeno pode ser explicado pelo fato da zona bioclimática 5 agrupar climas de temperaturas entre 15 e 28°C, amplitudes térmicas elevadas e apresentar temperaturas diárias na zona de conforto em desconforto por frio, principalmente no período noturno. Assim, as edificações, para atingirem a zona de conforto, necessitam de estratégias de aquecimento.
- No caso da espessura, as paredes espessas têm melhor comportamento pelo fato de apresentarem alta capacidade térmica, $CT = 504$ a $710 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$, e consequentemente

acumularem menos calor. Porém, a partir da espessura de 32cm a influência da espessura se torna irrelevante (Figura 163).

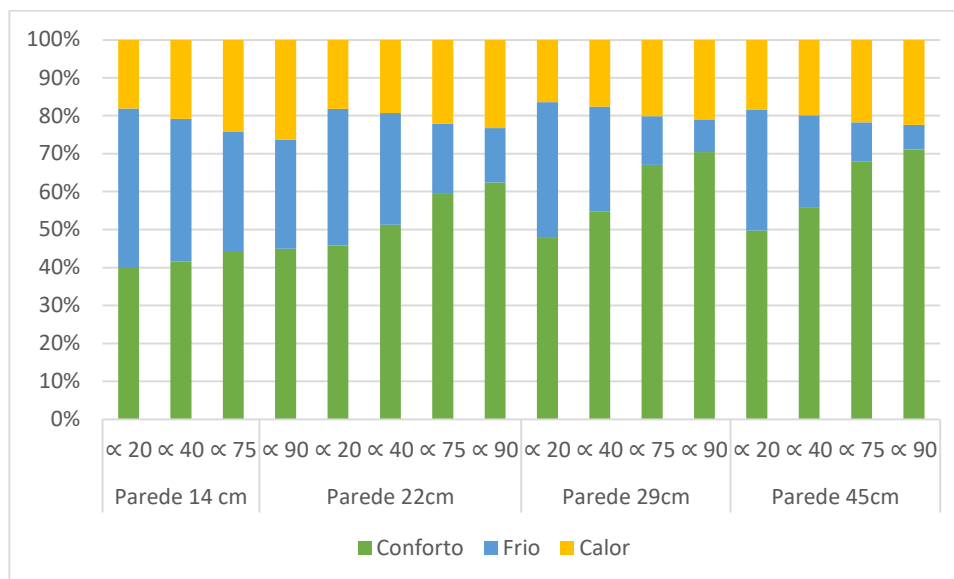


Figura 163 – Percentual de conforto e desconforto anual vs absorvância para zona bioclimática 5.

Ao observarmos a linha de tendência das espessuras, relacionando a absorvância com o percentual de conforto, percebe-se que a absorvâncias têm maior impacto nas paredes espessas, acima de 0,25cm, como previsto no trabalho de Chavtal (2014), para as zonas bioclimáticas 4, 6 e 8 no Brasil. Nesta simulação, observamos que a zona 5 apresenta o mesmo comportamento.

Em termos de cores, recomenda-se o uso de cores escuras como marrom ou preto, de modo a atingir absorvâncias acima de 0,75. Em termos de espessuras, verifica-se que acima de 32,00cm a edificação em adobe apresenta baixas contribuições para o aumento do conforto térmico. Assim, a partir desse ponto o aumento da espessura é irrelevante, pois a inércia térmica não apresenta mais efeito sobre a temperatura interna.

A tendência de estabilização dos valores a partir da espessura de 32,00cm decorre do fato de quanto maior a espessura, maior a sua capacidade térmica e maior acumulação de calor, e consequentemente, mais lenta a sua liberação. Ou seja, o calor acumulado durante o dia é liberado no período noturno. Assim, quanto maior a espessura, maior o calor liberado durante a noite, que por sua vez, pode ser excessivo, gerando desconforto, como verificado nos trabalhos de Rempel et Rempel (2013) (Figura 164).

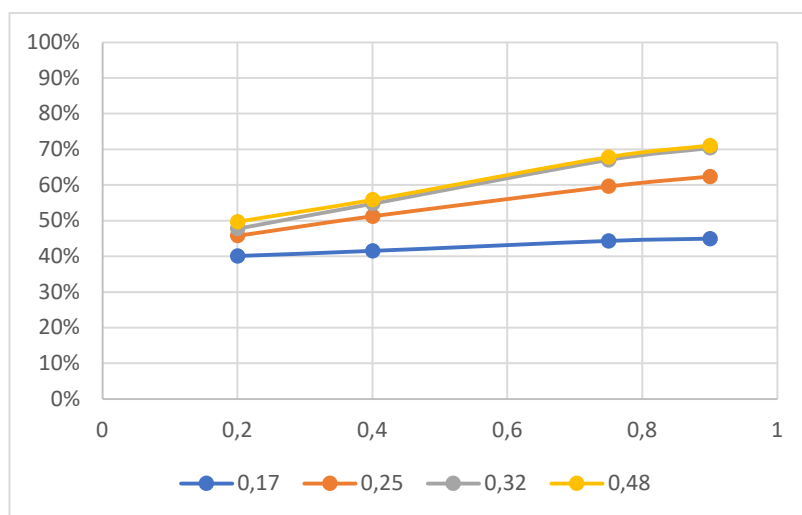


Figura 164 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absortância zona bioclimática 5.

Ao observarmos o percentual de conforto mensal dos modelos que apresentaram os melhores comportamentos, as paredes com 32,0 e 48,0cm com absortância de 0,75, constata-se que o maior percentual de conforto atingido é nos meses de janeiro e dezembro, chegando acima de 70%, quando o percentual de desconforto por calor é mais elevado. As piores condições ocorrem nos meses de junho a agosto, cujas médias oscilam entre 48 e 53%, quando o percentual de desconforto por frio é mais elevado (Figura 165).

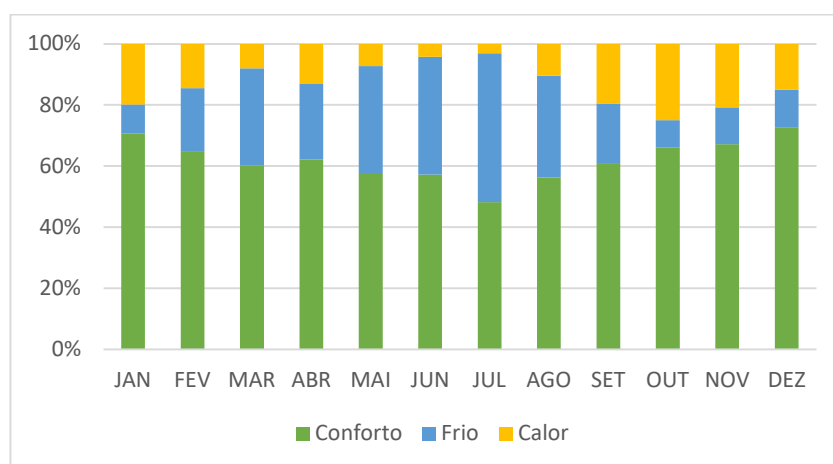


Figura 165 – Percentual de conforto e desconforto anual vs absortância para modelo parede $e=32\text{cm}$, $\alpha=0,75$ zona bioclimática.

7.2.2. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

Ao realizarmos a variação da absortância e das espessuras, verificamos que quanto menor a absortância, maior é o conforto e maior é a influência da espessura na variação do percentual de conforto, ao contrário do que ocorre na zona 5. O fenômeno pode ser explicado pelo fato de a zona bioclimática agrupar cidades com clima semiárido, com temperatura e amplitudes elevadas e apresentar um elevado desconforto por calor durante o ano. As edificações necessitam assim de estratégias de mais aquecimento, pois quanto menor a absortância, menor o calor absorvido. No caso das espessuras, verifica-se que têm baixa relevância, pois apresentam baixas diferenças entre si, não chegando a 10%. Neste caso a espessura que apresenta maior impacto é a de 48,0cm com $CT = 710 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, o que permite um maior equilíbrio entre as madrugadas frias e os dias quentes (Figura 166).

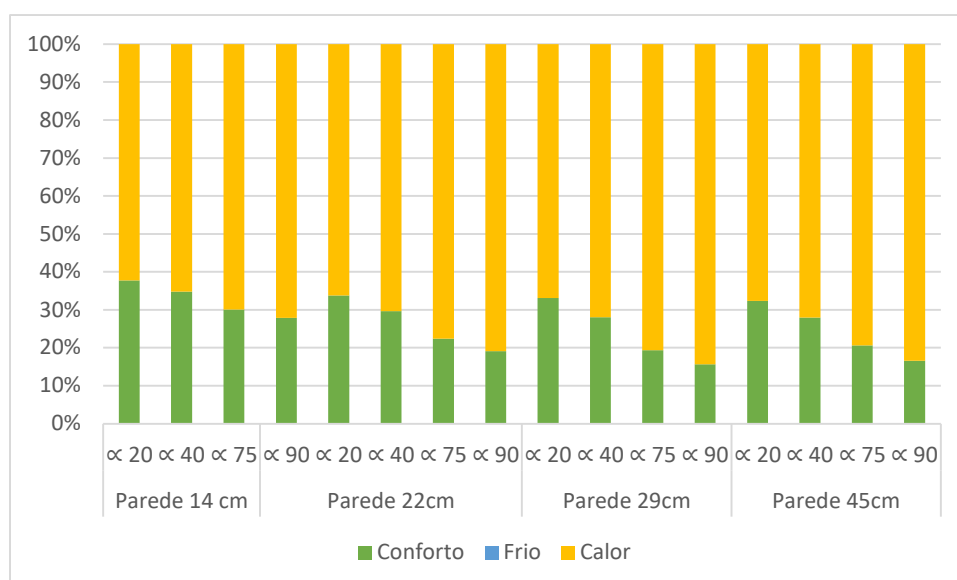


Figura 166 – Percentual de conforto e desconforto vs absortância

Ao observarmos a linha de tendência das espessuras, relacionando à absortância com percentual de conforto, percebe-se que:

- As absortâncias têm maior impacto nas paredes esbeltas, abaixo de 32,0 cm, como previsto no trabalho de (CHVATAL 2014), para as zonas bioclimáticas 4, 6 e 8 no Brasil, e observamos na zona 7, o mesmo comportamento.
- Em termos de cores, recomenda-se o uso de cores claras como branco, amarelo e azul claro, de modo a atingir absortâncias abaixo de 0,4.

- Em termos de espessuras, verifica-se que acima de 48,0cm, a edificação em adobe detém as melhores contribuições e a absorptância tende a reduzir sua influência sobre a temperatura interna da edificação.
- Entre 17,0cm entre 32,0cm, o aumento das espessuras é irrelevante. Observa-se no gráfico o fenômeno, cuja espessura de 17cm apresenta melhores condições de conforto do que as espessuras mais espessas, de 32cm (Figura 167).

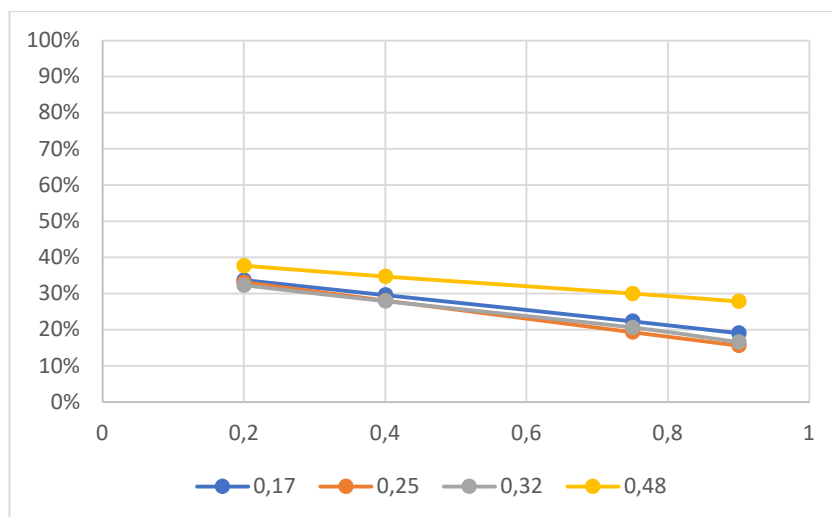


Figura 167 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorptância, zona bioclimática 05.

O que explica esse fenômeno é o aumento da capacidade térmica das paredes, que têm maior impacto no período do ano em que as noites são mais frias, no caso dos meses de maio, junho e julho. As paredes mais espessas de 48,0cm e $CT = 710 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ acumulam muito calor diurno, sendo mesmo liberado nos horários mais frios do dia, durante a madrugada e início das manhãs, permitindo o aquecimento da edificação e a redução do desconforto por frio. Enquanto que as paredes esbeltas, de 17,0cm, devido a sua moderada capacidade térmica, $CT = 278 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, acumulam pouco calor diurno e apresentam as menores temperaturas e o menor desconforto por calor no horário de maiores temperaturas, com pequenas diferenças entre as demais espessuras. No período noturno, detêm um elevado desconforto por frio, se comparadas aos demais modelos. Desse modo, temos modelos extremos:

- Um que amortece o desconforto por frio, no caso as paredes com $e \geq 48\text{cm}$ e apresenta o maior desconforto por calor.
- Outro que equilibra um pouco o desconforto por calor, as paredes esbeltas com $e \leq 17\text{cm}$.
- Temos ainda dois modelos intermediários: paredes de 25 e 32cm.

Assim conclui-se que a variação das espessuras apresenta pouco impacto, sendo mais relevante quando atinge espessuras bem elevadas com 48cm, isto é, quando as capacidades térmicas conseguem contribuir mais para o desconforto por frio do que para o calor (Figura 169). Porém, edificações com espessuras mais elevadas tendem a estabilizar as variações de temperatura, pois irão apresentar contribuições nulas para o desconforto por frio, como apontam Rempel et Rempel (2013).

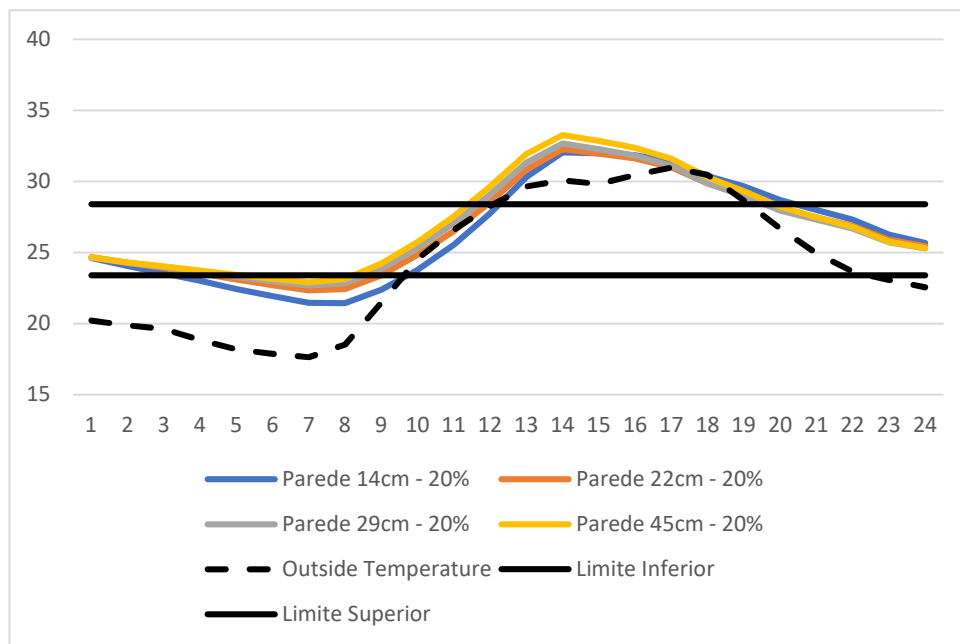


Figura 168 – Temperatura horário de um dia típico de inverno.

A absorptância fica acima de 0,2 com espessura entre 17,0cm e 48,0cm, com percentual mínimo de 31 a 37%, no mês de novembro, e máximo de 62 a 68% no mês de maio. Quando temos absorptâncias acima de 0,4, temos valores similares para as paredes de 17,0cm e 48,0cm. Em todos os modelos o desconforto por frio é irrelevante (Figura 169).

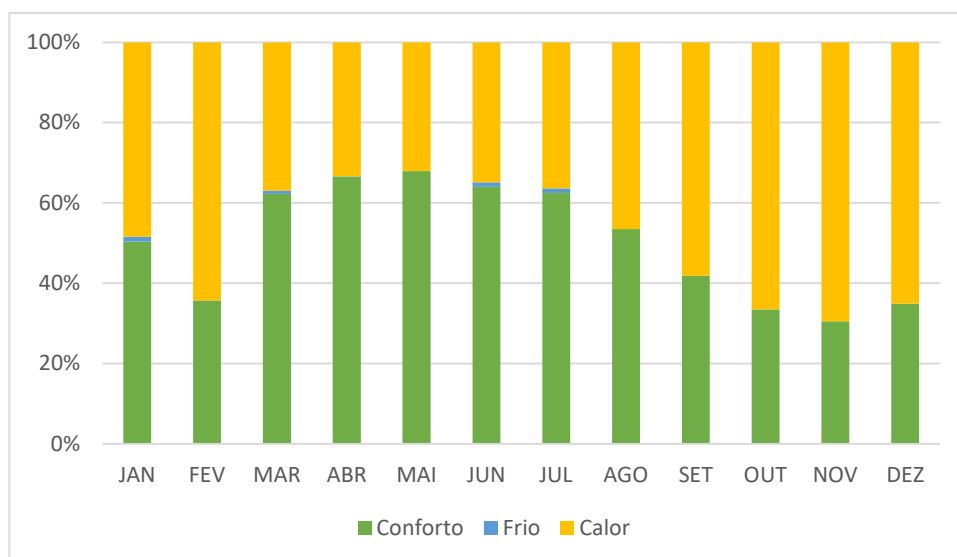


Figura 169 – Percentual de conforto e desconforto vs absorptância 0,2 com $e = 0,48\text{cm}$.

7.2.3. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

Ao realizarmos a variação da absorptância e das espessuras, verificamos que quanto menor a absorptância menores são as temperaturas internas, consequentemente melhor o percentual de conforto, como verificado nas pesquisas de Chavtal et al (2014). Quanto à variação das espessuras, verifica-se uma baixa influência sobre o comportamento térmico dos modelos. O fenômeno pode ser explicado pelo fato de a zona bioclimática 8 agrupar climas de temperaturas elevadas e baixas amplitudes térmicas diárias ou anuais. Logo, tende a apresentar temperaturas anuais em 70% de conforto, 20% em desconforto por calor e 10% de desconforto por frio, principalmente no período diurno. Assim, as edificações, para atingirem a zona de conforto, necessitam de estratégias de resfriamento.

O aumento da absorptância gera o aumento do desconforto por calor, do mesmo modo ocorre com o aumento das espessuras. No caso da variação da espessura não há impacto relevante, havendo uma tendência para as paredes esbeltas apresentarem comportamento um pouco melhor. Isso se deve ao fato de as paredes com menores espessuras apresentarem os menores valores de capacidade térmica, de $278 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$, enquanto as paredes espessas podem chegar a $710 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$. Paredes com elevada capacidade térmica provocam o aumento da inércia térmica, que em climas quentes, com baixa amplitude térmica, tende a gerar um amortecimento do calor diurno. Porém, esta situação provoca uma elevação das temperaturas no período noturno, gerando desconforto (Figura 170).

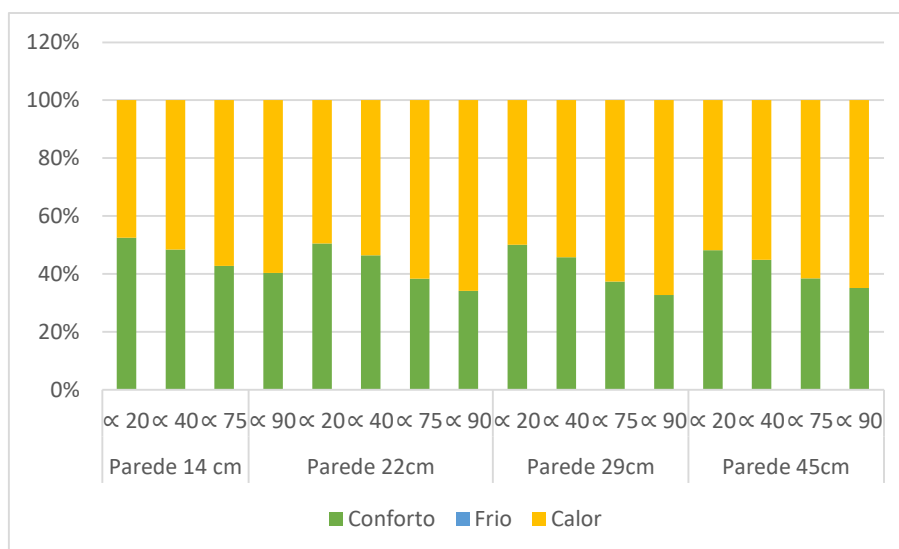


Figura 170 – Percentual de conforto e desconforto vs absortância para paredes - zona 8.

Ao observarmos a linha de tendência das espessuras relacionando-se à absortância com percentual de conforto, percebe-se que as espessuras entre 17,0cm e 48,0cm têm pouca relevância para o clima da cidade de Fortaleza, já que apresentam baixas variações entre si. As espessuras mais esbeltas de 17,0cm apresentam valores de conforto um pouco elevados, mas com baixa relevância. Por outro lado, a absortância de cores claras entre 0,2 e 0,6 apresenta as melhores condições de conforto, variando entre 43 e 53%. É um fenômeno similar à zona 7, pelo fato de serem climas de elevadas temperaturas, o que leva a crer que deve-se evitar o excesso de radiação dentro da edificação (ver Figura 171).

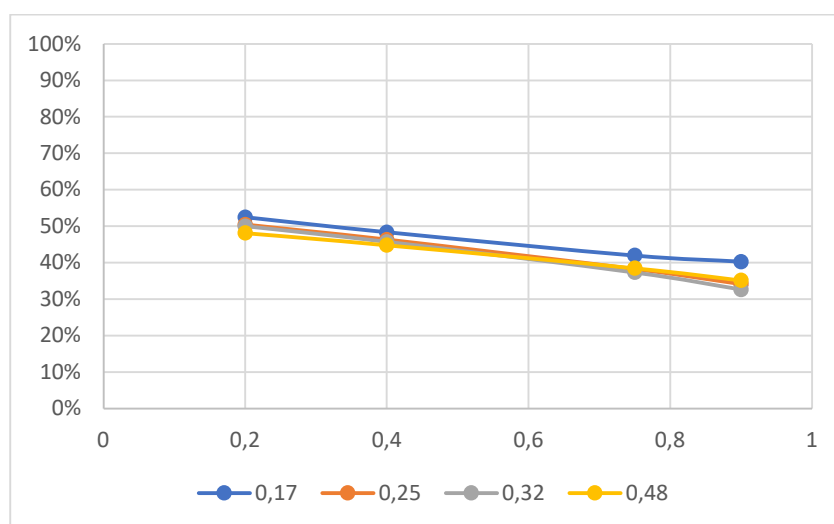


Figura 171 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absortância para zona bioclimática 08.

A variação das espessuras das paredes entre 17,0 e 48,0cm com absorvâncias máxima 0,4 em um **modelo sem forro** apresenta valores máximos entre 46 e 52% no mês de dezembro, enquanto o conforto mínimo no mês de maio fica entre 67 e 73%. Em geral, os modelos não apresentam desconforto por frio, somente por calor (Figura 172).

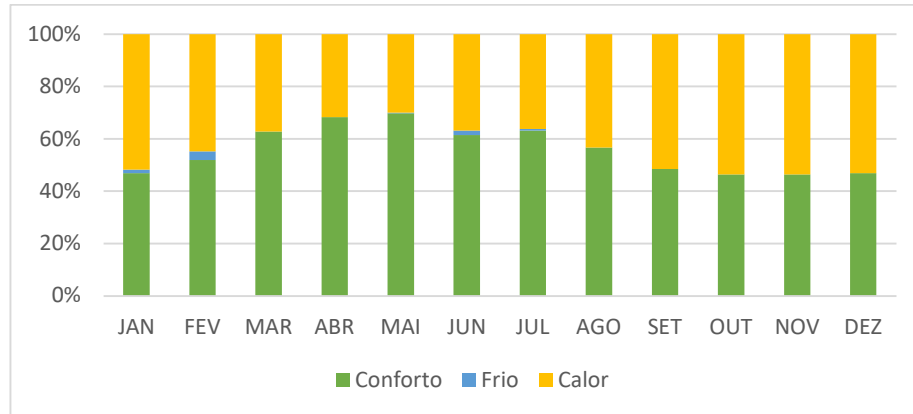


Figura 172 - Percentual de conforto e desconforto vs absorvância 0,4 com $e = 0,48\text{cm}$.

7.3. COBERTURAS

Nos experimentos de coberturas foram realizadas variações somente nos componentes ou materiais específicos, como absorvância, tipo de forro e isolamento. Cada propriedade foi analisada individualmente, mantendo as demais propriedades térmicas dos outros componentes do modelo original:

- A variação da absorvância se obteve com o uso de cores distintas, onde se variou valores de 20% a 90%, considerando a possibilidade de pinturas brancas e pretas com tinta látex.
- A variação dos tipos de forro, sejam leves ou pesados, permitiu atingir distintos valores de capacidade térmica, onde se observaram valores de transmitância aproximados e capacidade térmica com valores distintos.
- Com o uso de isolantes térmicos, como manta de lã de rocha, obteve-se valores distintos de transmitância térmica e pequenas variações na capacidade térmica (Tabela 64).

Tabela 65 - Propriedades térmicas das coberturas para edificações em adobe.

Propriedades térmicas	Unidade	Sem forro	Laje volterrana	Forro de gesso	Forro PVC
E telha	m	0,03	0,03	0,03	0,03
E forro	m	0	12	2	2
U	m ² .K	4,55	1,75	2,04	1,74
CT	kJ/m ² .K	18	391,26	28,76	21,04
α	-	0,2 a 0,9	0,2 a 0,9	0,2 a 0,9	0,2 a 0,9

7.3.1. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

O modelo habitacional em todas as suas variáveis de cobertura apresenta os piores percentuais de conforto se comparado às demais zonas com percentuais que variam de 23% a 73%, a depender do modelo, isto considerando que todos os modelos base apresentam paredes claras e esbeltas de 17,0cm, que não são as mais adequadas para esse clima.

Ao realizarmos a variação da absorvência e dos forros, verificamos que quanto maior a absorvência, isto é, cores escuras, melhores são os níveis de conforto no interior da edificação. No caso da presença do forro, nota-se uma melhoria substancial com qualquer tipo, seja leve ou pesado. Apesar das pequenas variações percentuais, entre os tipos de forro notam-se pequenas variações, sendo a laje volterrana aquela que apresenta os melhores resultados. O fenômeno pode ser explicado pelo fato da zona bioclimática 5 agrupar climas de temperaturas elevadas e altas amplitudes térmicas diárias ou anuais e tende a apresentar temperaturas anuais em 23% de conforto e 77% em desconforto por frio, principalmente no período diurno. As edificações para atingirem a zona de conforto, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), necessitam de estratégias de aquecimento com coberturas pesadas com cores escuras.

As cores escuras, com absorvências maiores que 0,75, contribuem para a maior absorção do calor, a redução do desconforto por frio e o aumento do desconforto por calor, principalmente nos modelos com forro. Esse fenômeno se justifica pela transmitância térmica do modelo sem forro, $U = 4,55 \text{ m}^2\text{K}$, que provoca rápidas trocas de calor no período noturno e diurno. Os modelos com forro tendem a anular o desconforto por calor e reduzem o desconforto por frio. O desconforto por calor é reduzido pelo fato de o forro com câmara de ar tornar as trocas de calor menores, pois apresentam transmitâncias mais baixas com $U = 2,00; 1,75 \text{ e } 1,74 \text{ m}^2\text{K}$, para gesso, laje volterrana

e PVC, respectivamente. Desse modo, ganha-se menos calor diurno e perde-se menos calor noturno. No caso da laje volterrana, que apresenta um percentual de conforto um pouco melhor, a sua elevada capacidade térmica, com $391,26 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$, tende a contribuir para a inércia térmica, gerando um maior amortecimento diurno e uma liberação de calor no período noturno (ver Figura 173).

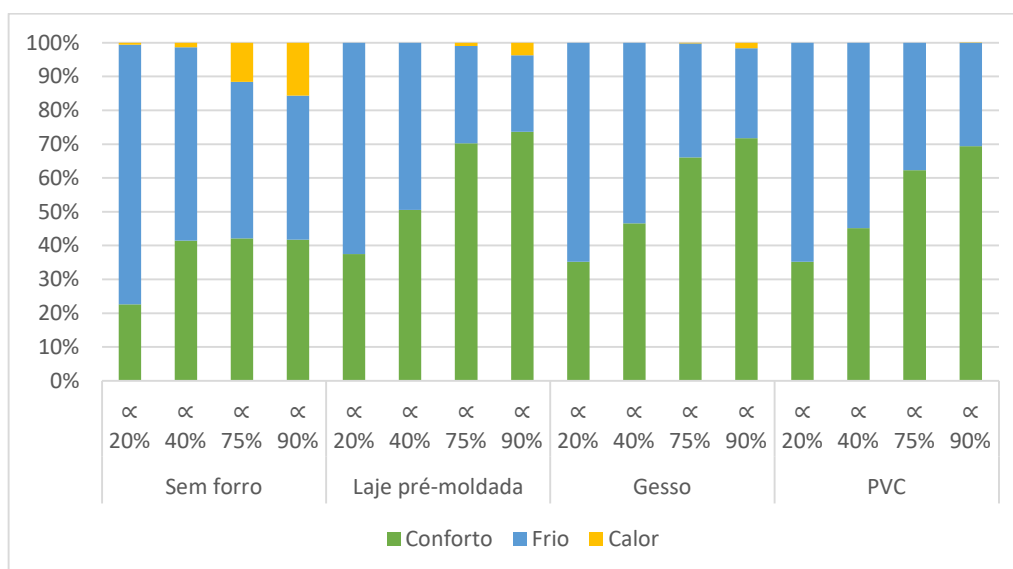


Figura 173 – Percentual de conforto e desconforto vs absortância para coberturas zona 5.

Ao observarmos a linha de tendência dos tipos de cobertura relacionando-se à absortância com percentual de conforto, percebe-se que as coberturas com forro apresentam comportamento e valores similares sempre crescentes quando se aumenta a absortância, por apresentarem transmitâncias térmicas muito próximas. Por sua vez, a diferença entre elas é gerada por possuírem capacidades térmicas diferentes.

A cobertura sem forro tem um comportamento bem distinto, apresentando uma tendência de crescimento até a absortância 0,4, depois o percentual de conforto tende a estabilizar. O fenômeno pode ser explicado pela baixa transmitância térmica da cobertura, $U = 4,55 \text{ m}^2\cdot\text{K}$. Quando há elevadas absortâncias, eleva-se a captação de calor diurno e aumento do desconforto por calor. Enquanto no período noturno reduz-se o desconforto por frio devido ao aumento de calor absorvido. Deste modo, o aumento das trocas de calor não altera as taxas de conforto e equilibram-se assim as perdas e ganhos de calor (Figura 174).

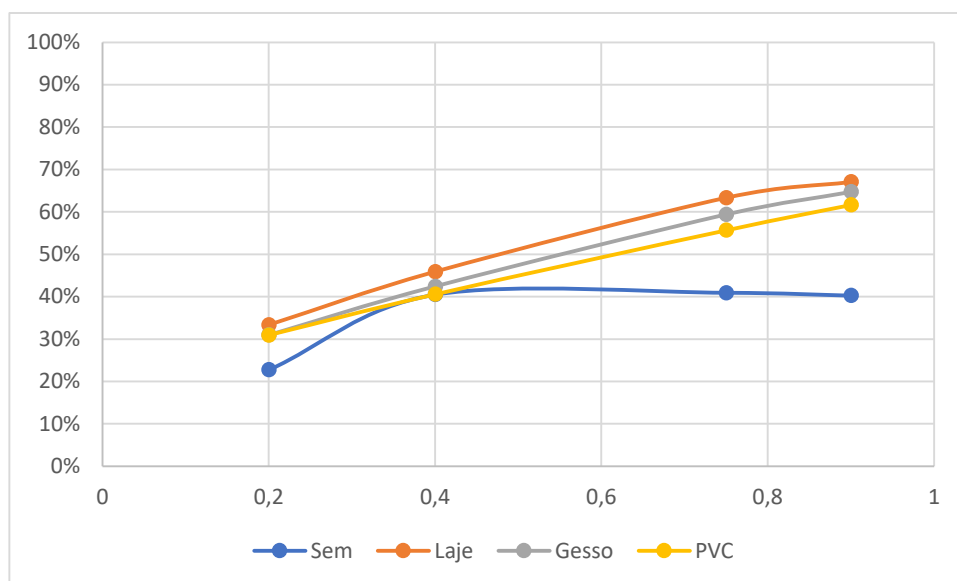


Figura 174 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absortância para as coberturas na zona bioclimática 5.

Dentre as variáveis, verificou-se que quaisquer tipos de forro com absortância acima de 0,90 apresentam um percentual de conforto de 80% a 72% no mês de janeiro e 39% a 47% no mês de julho. O mesmo é válido para os forros de laje volterrana com $\alpha = 0,75$, isto é, sem pigmentação. Em geral, os modelos não apresentam desconforto por calor, somente desconforto por frio (Figura 175).

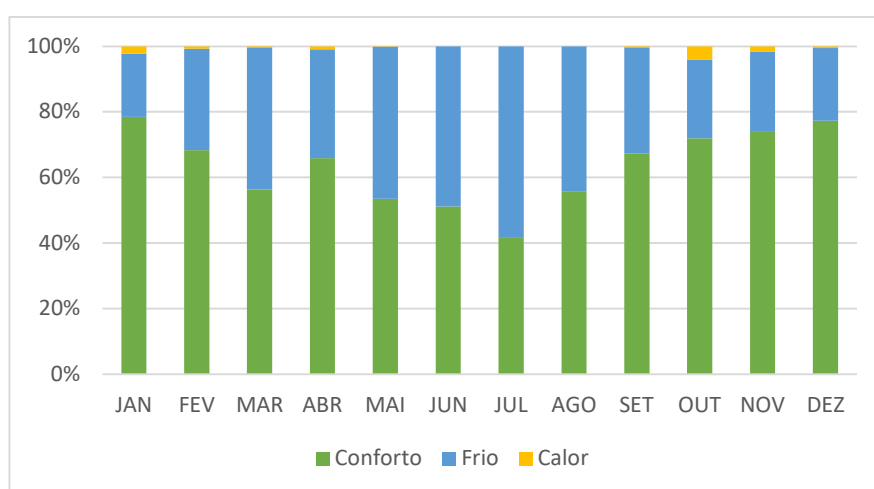


Figura 175 – comportamento anual do conforto e desconforto para o modelo de cobertura com $\alpha = 0,75$ e laje na zona bioclimática 5.

7.3.2. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

O modelo habitacional em todas as suas variáveis de cobertura apresenta percentuais de conforto melhores do que a zona 5, variando de 46% a 80%, a depender do modelo. O uso de paredes esbeltas com cores claras em todos os modelos, neste caso de clima quente, tende a contribuir para um melhor percentual de conforto.

Ao realizarmos a variação da absortância e dos tipos de forro, verificamos que quanto menor a absortância maior é o conforto, ao contrário do que se percebe da zona 5. Quanto à presença do forro, todos apresentam comportamentos e temperaturas similares: moderado percentual de conforto, moderado desconforto por calor e desconforto por frio praticamente nulo. O modelo sem forro apresenta desconforto por frio e calor e um conforto abaixo dos demais modelos em qualquer absortância.

As coberturas com pigmentações claras permitem atingir baixas absortâncias, durante o período diurno são absorvidas baixas taxas de calor pela cobertura, reduzindo o desconforto por calor. A presença do forro anula o desconforto por frio pelo fato de elevar a transmitância da cobertura, o que reduz as trocas de calor, fazendo com que o calor liberado pelas paredes de adobe nos horários de maior frio se conserve na edificação. A redução do calor, por sua vez, se dá pelo fato do conjunto câmara de ar e forro apresentar moderada condutividade térmica material. Os valores de conforto e desconforto entre os forros é similar, pois a câmara de ar apresenta a mesma dimensão de 1,00 para todos, e a espessura de cada forro é muito inferior à mesma, variando de 12,0 a 2,0cm. Quando não se utiliza forro, devido à baixa transmitância, $U = 4,55 \text{ m}^2.\text{K}$, há um rápido ganho de calor no período diurno e no período noturno perde-se calor rapidamente, gerando o desconforto por frio, devido à alta amplitude térmica do clima (Figura 176).

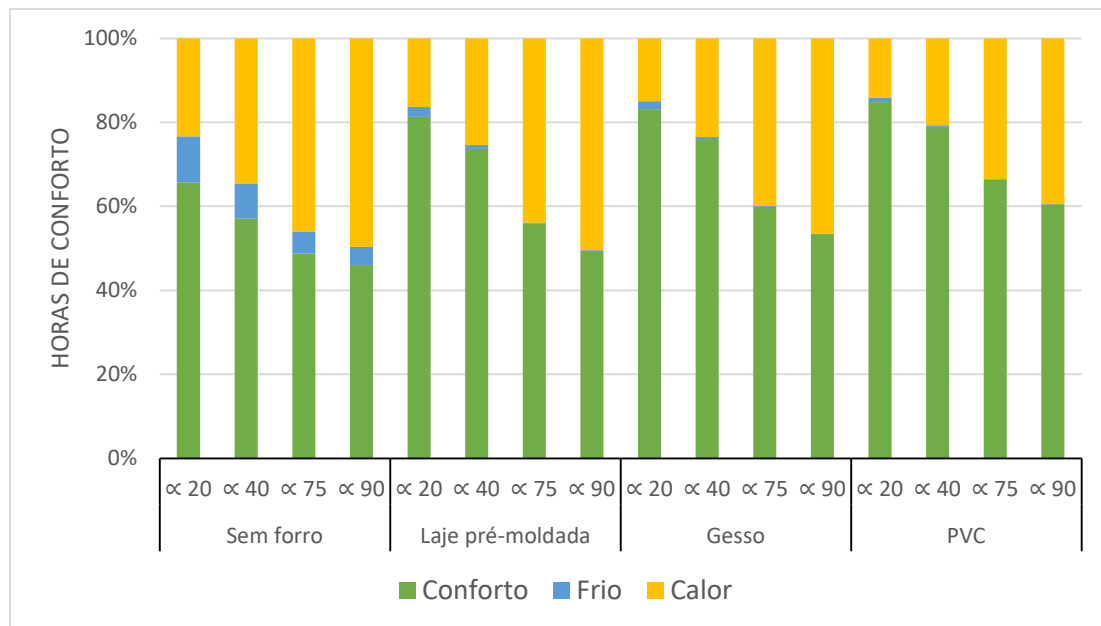


Figura 176 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvância para as coberturas na zona 7

Ao observarmos a linha de tendência dos tipos de cobertura relacionando-se a absorvância com o percentual de conforto, percebe-se que as absorvâncias têm maior impacto nas coberturas com forro, que apresentam menores valores de transmitância. No caso da cobertura sem forro, ocorrem rápidas trocas de calor, então a variação do conforto em relação à absorvância é bem menor que nos outros modelos. Desse modo, ao aumentar a absorvância, para qualquer tipo de forro, reduz-se o conforto.

Nesse clima recomenda-se assim o uso de absorvância até 0,4. Dentre os tipos de forro, verifica-se que todos apresentam percentuais de conforto muito similares até a absorvância de 0,4. Acima desse valor, as diferenças tendem a ser um pouco mais relevantes, mas não chegam a 10%. O PVC é aquele que apresenta o melhor comportamento, o que pode ser explicado pelo fato de esse tipo de forro apresentar os menores valor de capacidade térmica, $CT = 20 \text{ kJ/m}^2.K$ (Figura 177).

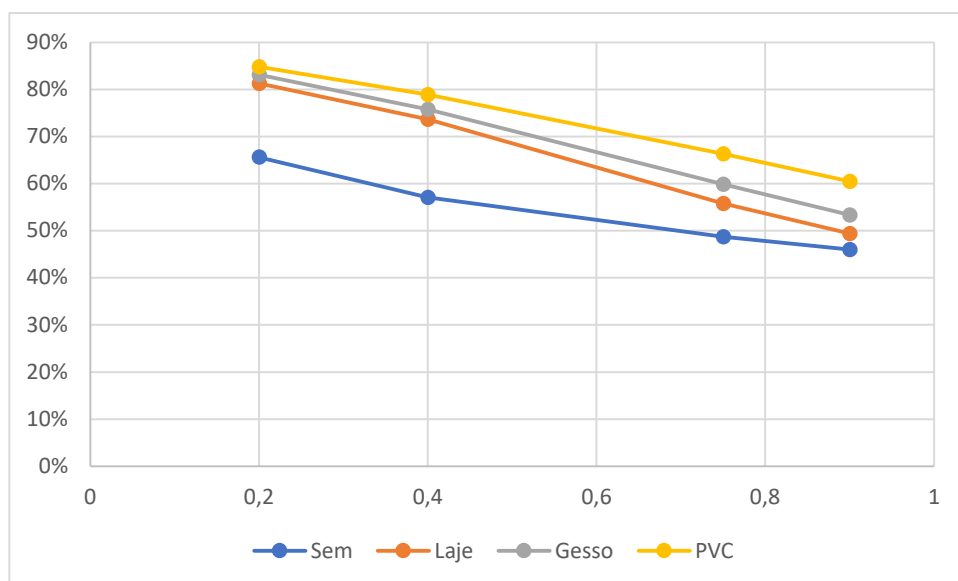


Figura 177 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absortância para zona bioclimática 7.

Dentre as variáveis, verificou-se que quaisquer tipos de forro com absortância com $\alpha \leq 0,20$ apresentam um ótimo percentual de conforto entre os meses de março e agosto, variando de 96% a 99%. Enquanto no mês de setembro a fevereiro temos percentuais muito baixos de 59% a no máximo 86%. Em geral, os modelos não apresentam desconforto por calor, somente desconforto por frio (Figura 178).

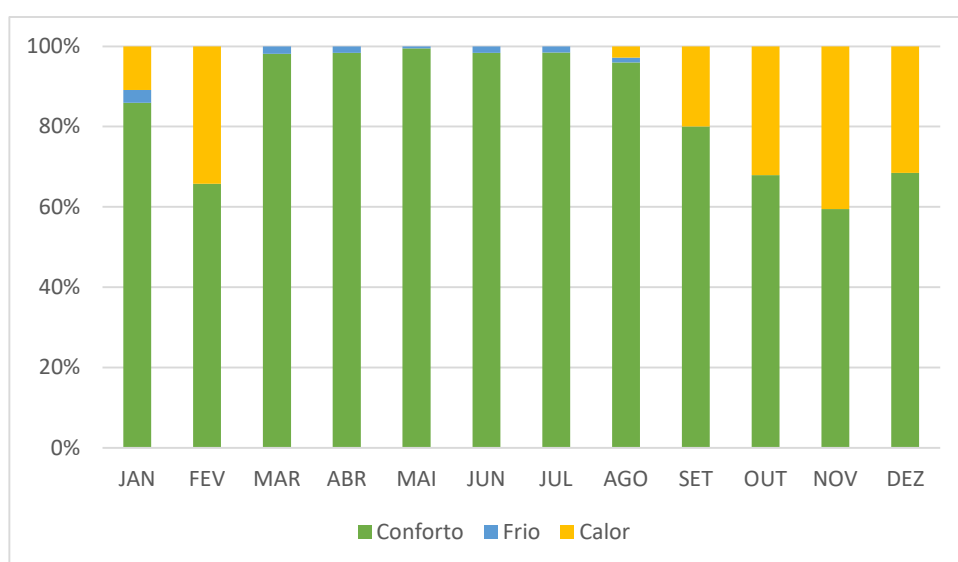


Figura 178 – comportamento anual do conforto e desconforto para o modelo de cobertura com $\alpha = 0,4$ e forro PVC na zona bioclimática 7.

7.3.3. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

O modelo habitacional em todas as suas variáveis de cobertura apresenta os melhores percentuais de conforto se comparado às demais zonas com percentuais que variam de 43% a 97%, a depender do modelo. Os elevados percentuais de conforto podem ser compreendidos pelo fato de o próprio clima apresentar elevados percentuais de conforto de 71%, 21% de desconforto por calor e um baixo desconforto por frio, 8%.

Ao realizarmos a variação da absorvência e dos tipos de forro, verificamos que quanto menor a absorvência maior é o conforto, como ocorre de forma similar na zona 7, por ambos serem climas quentes. Quanto à presença do forro, todos apresentam comportamentos e temperaturas similares: moderado percentual de conforto, moderado desconforto por calor e desconforto por frio nulo. O modelo sem forro apresenta desconforto por calor e um conforto abaixo dos demais modelos em qualquer absorvência.

A presença do forro reduz o desconforto por calor e elimina o baixo desconforto do frio. A redução do calor se dá pelo fato de o conjunto de câmara de ar e forro apresentar moderada condutividade térmica material. Os valores de conforto e desconforto entre os forros é similar, pois a câmara de ar apresenta a mesma dimensão de 1m para todos, e a espessura de cada forro é muito inferior à mesma, variando de 12,0 a 2,0cm. O modelo com laje volterrana apresenta os menores percentuais de conforto, pelo fato de deter a maior capacidade térmica, gerando acúmulo de calor diurno e liberação de calor no período noturno, gerando um maior desconforto por calor. Quando não se utiliza forro, devido à baixa transmitância, $U = 4,55 \text{ m}^2.\text{K}$, há um rápido ganho de calor no período diurno (Figura 179).

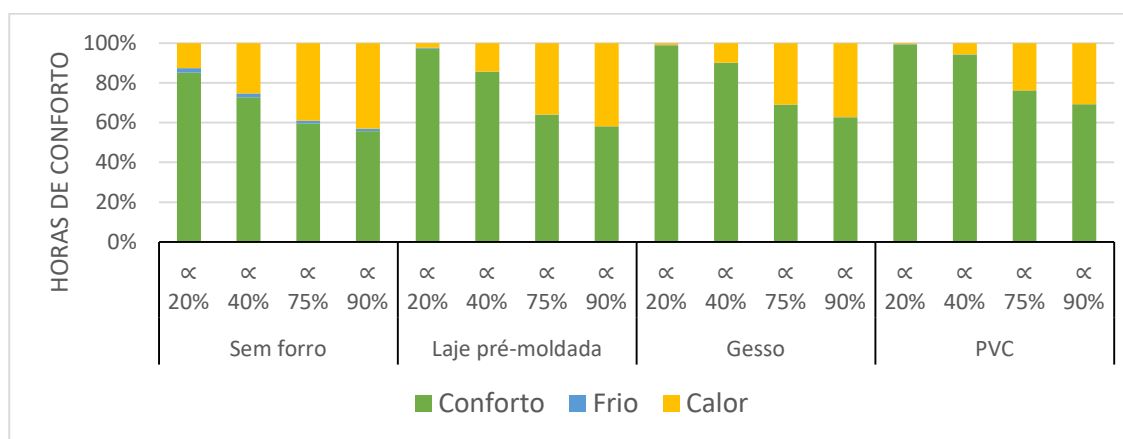


Figura 179 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvência das coberturas na zona bioclimática 8.

Ao observarmos a linha de tendência dos tipos de cobertura, relacionando-se a absorvância com percentual de conforto, percebe-se que a absorvância tem maior impacto nas coberturas com forro por terem os menores valores de transmitância. No caso da cobertura sem forro, ocorrem rápidas trocas de calor, então a variação do conforto em relação à absorvância é bem menor que nos outros modelos. Assim como, ao aumentar a absorvância, para qualquer tipo de forro, reduz-se o conforto.

Dentre os tipos de forro verifica-se que todos apresentam percentuais de conforto muito similares até a absorvância de 0,6. Acima desse valor, as diferenças de conforto entre os modelos tendem a ser um pouco mais relevantes, mas não chegam a 10%. O PVC é aquele que apresenta o melhor comportamento, o que pode ser explicado pelo fato de esse tipo de forro apresentar os menores valores de capacidade térmica, $CT = 20 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (ver Figura 180).

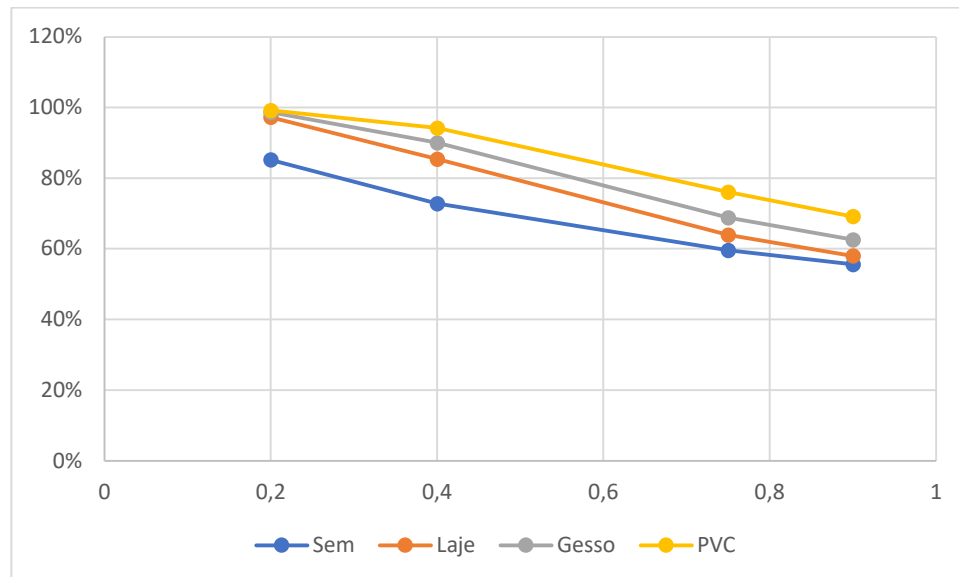


Figura 180 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorvância para zona bioclimática 8.

Dentre as variáveis, verificou-se que quaisquer tipos de forro com absorvância com $\alpha \leq 0,20$ apresentam um percentual de conforto de 100% no mês de maio a agosto e 90% a 96% para o restante do ano. O mesmo é válido para o forro de PVC com $\alpha \geq 0,40$. Em geral, os modelos não apresentam desconforto por calor, somente por frio (Figura 181).

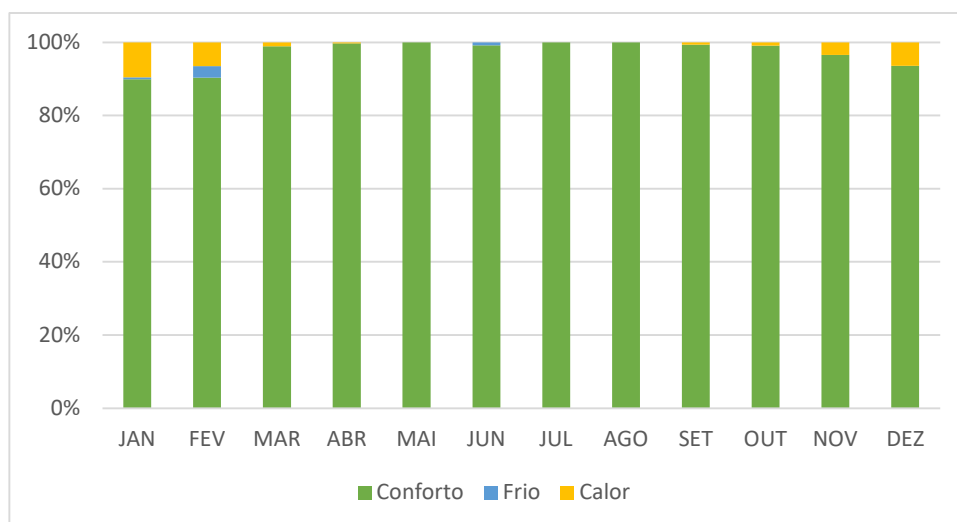


Figura 181 – comportamento anual do conforto e desconforto para o modelo de cobertura com $\alpha = 0,2$ e forro com laje volterrana na zona bioclimática 8.

7.4. ISOLAMENTO TÉRMICO DAS COBERTURAS

Como previsto por Chvatal (2014) e Desogus (2014), a variação dos tipos de coberturas apresenta maior impacto do que a variação das espessuras ou cores de paredes. Foi observado, também, no modelo MCVm em adobe que as zonas bioclimáticas 5 e 7 não apresentaram bom comportamento a partir do uso de soluções simples e econômicas como pigmentação das paredes e coberturas, variação das espessuras das paredes e variação dos tipos de forro. Assim, optou-se por realizar novas simulações, utilizando-se o isolamento térmico das coberturas.

O isolamento térmico foi atingido a partir da inserção de uma manta de lã de rocha sobre os forros, de modo a atingir valores de transmitância mais baixos, variando de 0,58 a 0,62 $\text{m}^2\cdot\text{K}$. Quanto aos valores de capacidade térmica, notou-se pouca variação em relação aos modelos sem isolamento (ver Tabela 66 e Figura 182).

Tabela 66 - Propriedades térmicas das coberturas isoladas.

Propriedades térmicas	Unidade	Laje volterrana	Forro de gesso	Forro PVC
E telha	m	0,03	0,03	0,03
E forro	m	0,12	0,02	0,02
U	$\text{m}^2\cdot\text{K}$	0,58	0,62	0,58
CT	$\text{kJ}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	393,13	30,63	27,53

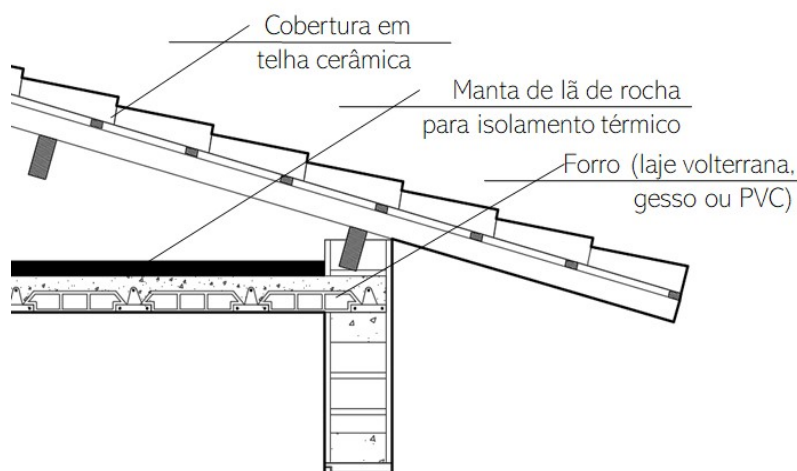


Figura 182 – Detalhe de cobertura de forro com isolamento.

7.4.1. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

O uso de isolamento não aparenta ser uma solução benéfica, pois tem aumentado o desconforto por frio. Esse fenômeno pode ser explicado, por o isolamento anular a passagem do calor externo pela cobertura, a principal fonte de aquecimento da edificação, provocando assim o seu resfriamento. (Figura 183).

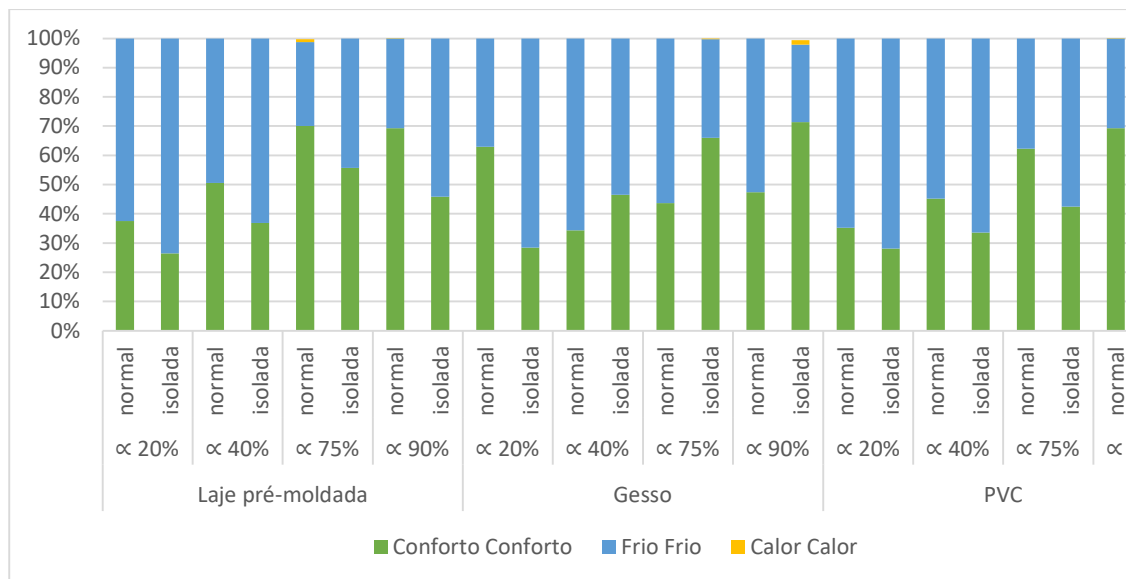


Figura 183 – Percentual de conforto e desconforto vs absorvância para cobertura isoladas na zona 5.

A presença do isolamento no forro PVC e gesso provocou uma redução da influência da absorvância sobre a temperatura interna do modelo, apresentando uma diferença de conforto de

15% entre a absorptância 0,2 e 0,9. No caso da influência da presença da laje, se apresentou similar ao modelo sem isolamento, porém, com valores menores (Figura 184).

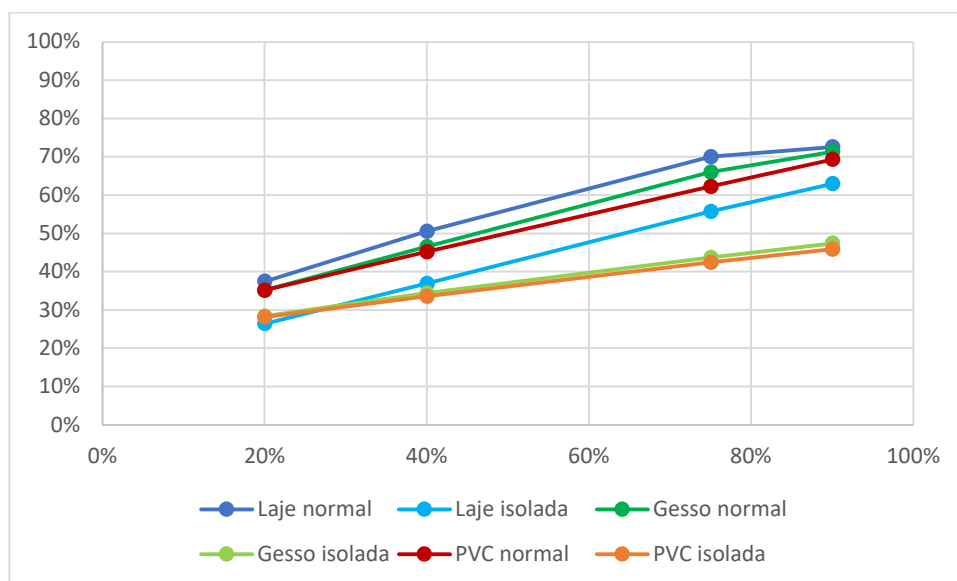


Figura 184 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absorptância para zona 5.

Ao verificarmos o desempenho por conforto térmico das variáveis, percebe-se que todos os modelos com forro isolado e cobertura com $\alpha \leq 0,75$ apresentaram um desempenho muito baixo, atingindo um percentual de conforto acima de 80% somente nos meses de janeiro e dezembro. Nos meses de maio e de agosto, o desempenho atingiu seus piores índices, sempre abaixo de 50% (Figura 185).

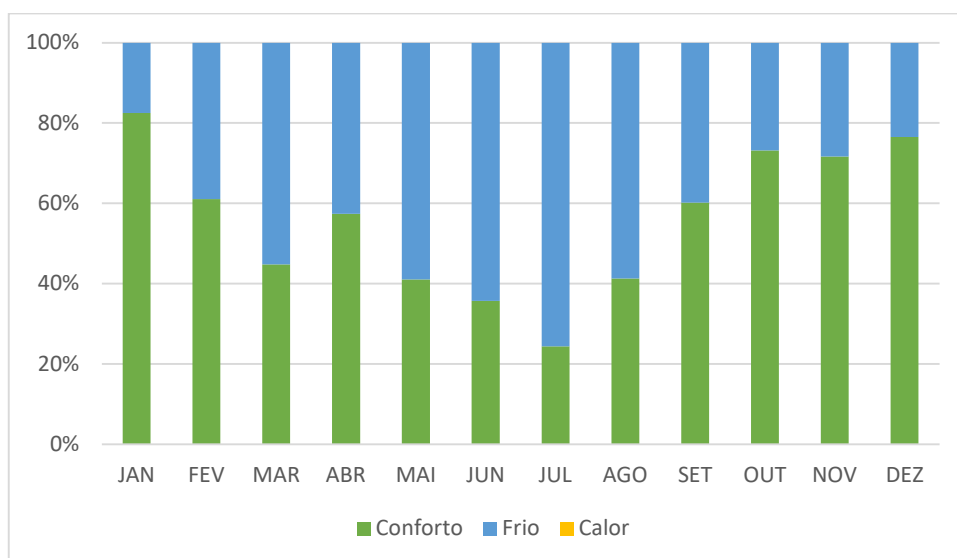


Figura 185 – Cobertura com $\alpha = 20\%$ e laje de forro isolado.

7.4.2. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

O uso de isolante térmico no forro das cobertas na zona 7 reduziu a entrada de calor pela cobertura, reduzindo o desconforto por calor, como previsto por (DE PAULA 2017) e (OLARTECHEA et al. 2015). Isso permitiu um aumento substancial do conforto, garantindo que todos os modelos com forro atingissem valores aproximados, quando estão na mesma absorptância. As coberturas com $\alpha \leq 0,4$, os valores de absorptância se aproximam dos 90%. Enquanto as coberturas com $\alpha > 0,4$ apresentam valores de conforto variando entre 77 e 82%. Quando o desconforto o isolamento elimina qualquer desconforto por frio (Figura 186).

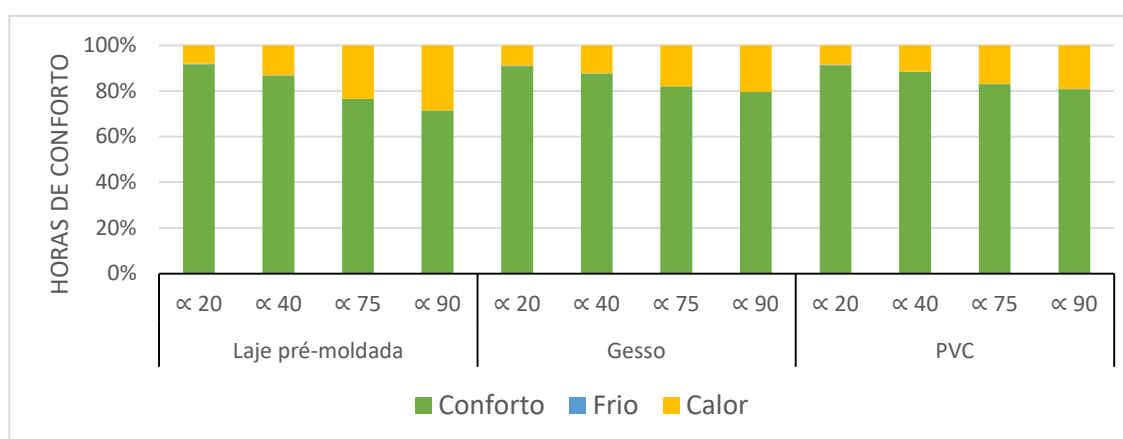


Figura 186 – Percentual de conforto e desconforto vs absorptância para cobertura isoladas na zona 7.

A presença do isolamento provocou a diminuição da influência da absorptância sobre a temperatura operativa interna. Em termos de comportamento dos forros, verifica-se que, com a variação da absorptância, os forros apresentam comportamentos similares, havendo uma diferenciação de teor de conforto a partir da absorptância 0,6, quando a laje volterrana passa a apresentar um percentual de conforto mais baixo devido a sua elevada capacidade térmica. Já o gesso e o PVC permanecem iguais, por apresentarem capacidades térmicas semelhantes. Em termos de ponto de conforto ideal, recomenda-se o uso de coberturas isoladas com absorptâncias até 0,4, quando o percentual para todos os tipos de forro, leves ou pesados, é de 88% (Figura 187).

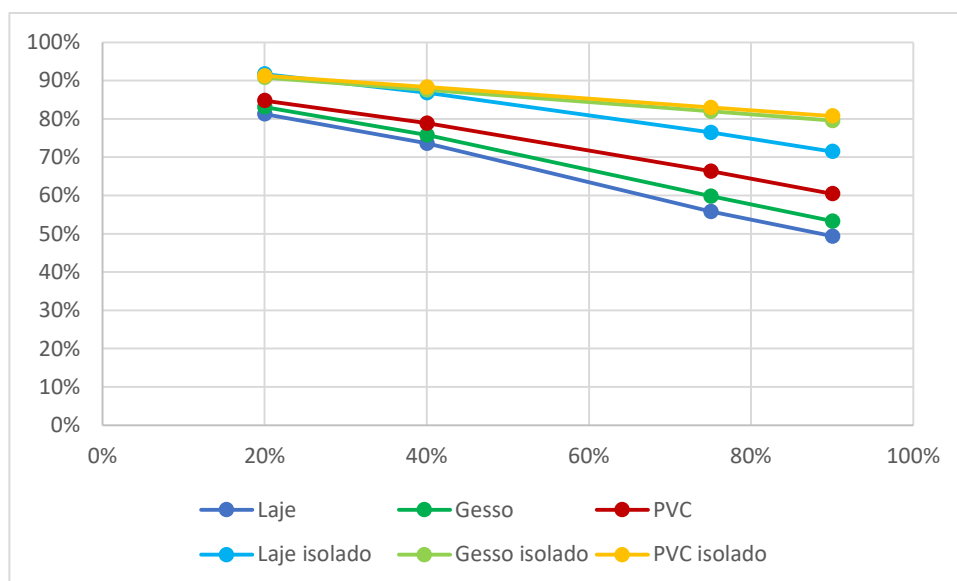


Figura 187 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absortância para zona bioclimática 7.

Verificamos que todos os modelos com forro isolado e $\alpha \leq 0,4$ apresentaram o melhor desempenho anual, chegando em valores acima de 88%. Porém, quando se verifica o desempenho distribuído ao longo dos meses, constata-se que todos os forros com $\alpha \leq 0,2$ e laje volterrana com $\alpha \leq 0,4$ conseguem manter um percentual de conforto acima de 75% nos meses de outubro a fevereiro. Nos meses de março a setembro, o percentual de conforto se apresenta acima dos 80% (Figura 188).

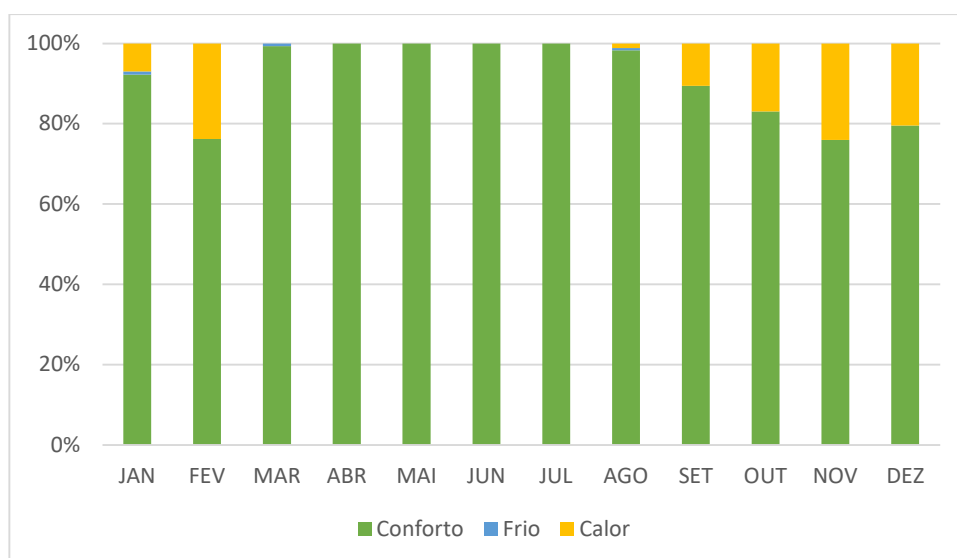


Figura 188 – Forro PVC a 20%.

7.4.3. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

O uso de isolamento térmico no forro das cobertas na zona 8 fez com que se eliminasse o desconforto por calor em todos os forros com baixas absorptâncias e não provocou o surgimento de desconforto por frio. Em coberturas pesadas com absorptâncias elevadas, o desconforto por calor atingiu valores de no máximo 16%; nas coberturas leves, atingiu 68% (Figura 189).

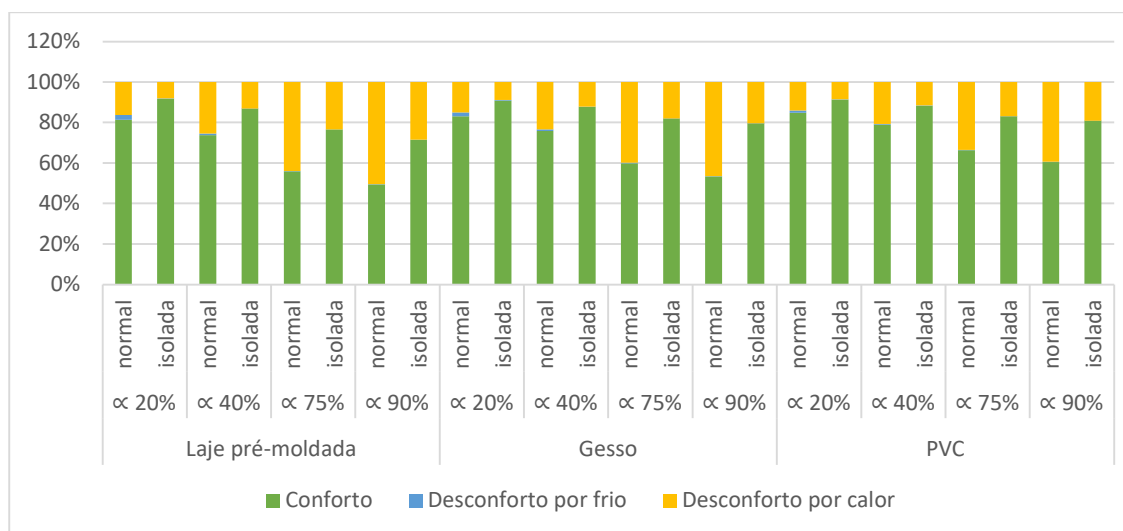


Figura 189 – Percentual de conforto e desconforto vs absorptância para coberturas isoladas na zona 8.

A presença do isolamento provocou a diminuição da influência da absorptância sobre a temperatura operativa interna. Em termos de comportamento dos forros, verificou-se que, com a variação da absorptância, os forros apresentam comportamentos similares, havendo uma diferenciação de teor de conforto a partir da absorptância 0,6, quando a laje volterrana, forro pesado, passa a apresentar um percentual de conforto mais baixo devido a sua elevada capacidade térmica. Já os forros leves, gesso e PVC, permanecem iguais, por apresentarem capacidades térmicas semelhantes.

Em termos de ponto de conforto ideal, recomenda-se o uso de coberturas isoladas com absorptâncias até 0,40 para qualquer tipo de forro quando o percentual de conforto é aproximadamente 90%: No caso dos forros leves, não há restrição para os valores de absorptância (Figura 190).

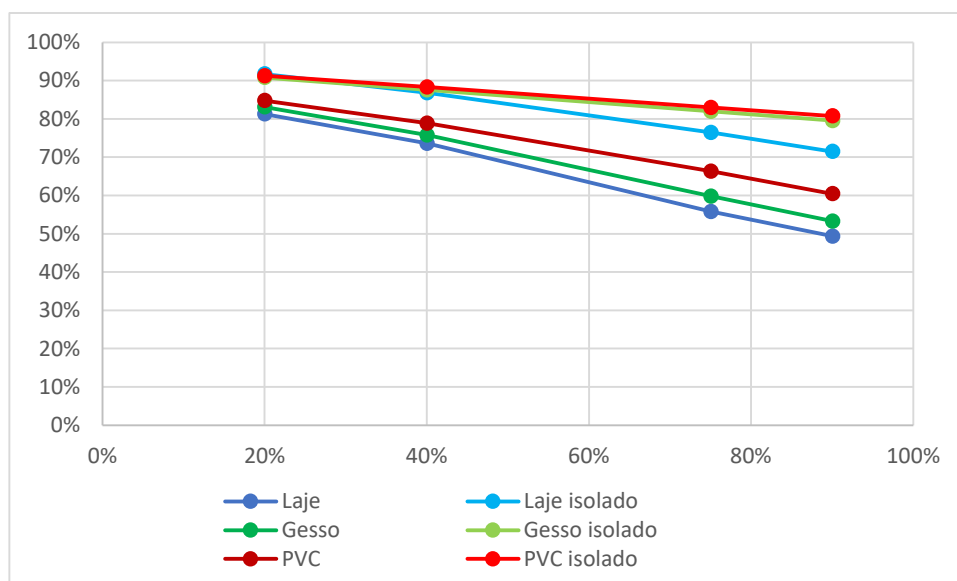


Figura 190 – Linha de tendência do percentual de conforto anual vs absortância zona bioclimática 8.

Verificamos que todos os modelos de cobertura com forro isolado e $\alpha \leq 0,4$ e modelos com forro PVC e gesso e $\alpha \leq 0,75$ apresentaram o melhor desempenho anual, chegando em valores acima de 80%. Quando se verifica o desempenho distribuído ao longo dos meses, constata-se que todas as coberturas com quaisquer forros com $\alpha \leq 0,2$ e coberturas forro de laje volterrana com $\alpha \leq 0,4$ conseguem manter um percentual de conforto acima de 80% nos meses de dezembro a fevereiro (3 meses). Durante os meses de março a outubro, o percentual de conforto se apresenta acima dos 90% (Figura 191).

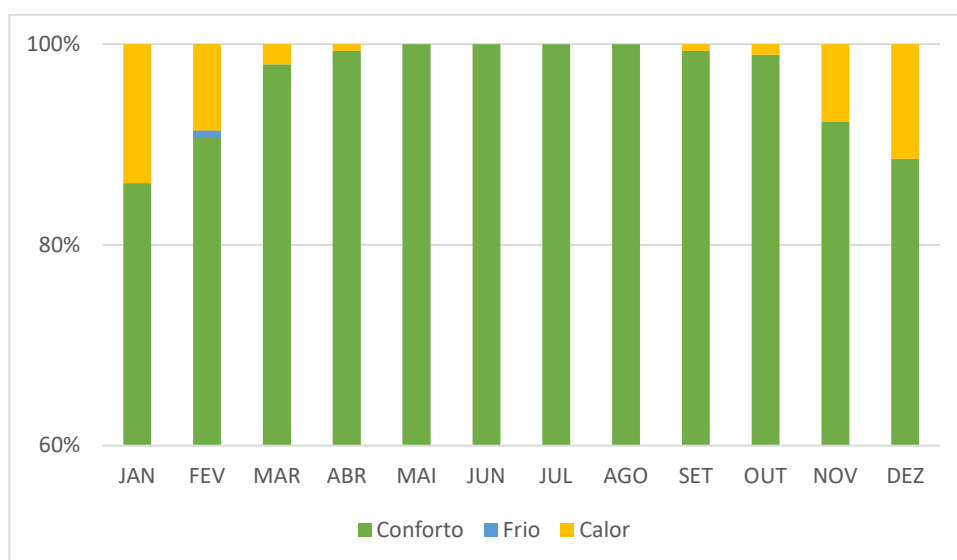


Figura 191 – Forro de gesso PVC com isolamento e $\alpha = 0,75$.

8. RECOMENDAÇÕES PARA ENVOLTÓRIA

Ao fim das simulações, conclui-se que as zonas bioclimáticas apresentam parâmetros distintos para os componentes da envoltória e que necessitam ser validados em soluções que mesclam as melhores paredes e coberturas para verificar a possibilidade de incrementar o seu percentual de conforto, por apresentarem valores anuais abaixo de 80% de percentual de conforto.

Para a **zona bioclimática 5**, por apresentar um clima tropical com inverno seco e subúmido chuvoso, conclui-se que a edificação necessita de uma envoltória de cores escuras e com moderada inércia térmica. As cores escuras com elevadas absorptâncias com $\alpha \geq 0,75$, permitem uma maior absorção de calor. Os componentes de paredes e coberturas com elevada inércia térmica apresentam elevada capacidade térmica para amortecer o calor diurno e acumular calor para ser liberado no período noturno.

A partir de uma análise individual dos componentes da envoltória, paredes e coberturas, verifica-se um moderado percentual de conforto, onde se fazem necessárias novas simulações combinando as melhores soluções de paredes com coberturas. Com a variação das espessuras e absorptâncias de paredes em um modelo sem forro, chegamos a percentuais muito baixos de conforto anual de 67 a 71% e quando distribuídos ao longo dos meses, entre 48 a 75%. Com a variação das coberturas com forro com $\alpha \geq 0,90$, mantendo as paredes do modelo de referência com 17cm e cor branca, o percentual de conforto anual foi similar: 62 a 67%. Quando se utilizam forros pesados, como laje volterrana, podem-se utilizar telhas cerâmicas sem pigmentação, isto é, absorptância com valores $\alpha \geq 0,75$ (Tabela 67 e Figura 192).

Tabela 67 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 5.

Parâmetros		Percentual de conforto mensal	Percentual de conforto anual
Coberturas	forro + $\alpha \geq 0,90$	40 a 80%.	67 a 62%
	forro pesado + $\alpha \geq 0,75$		
Paredes	32 e 48 acima de $\alpha \geq 0,75$	48 e 75%	67 a 71%

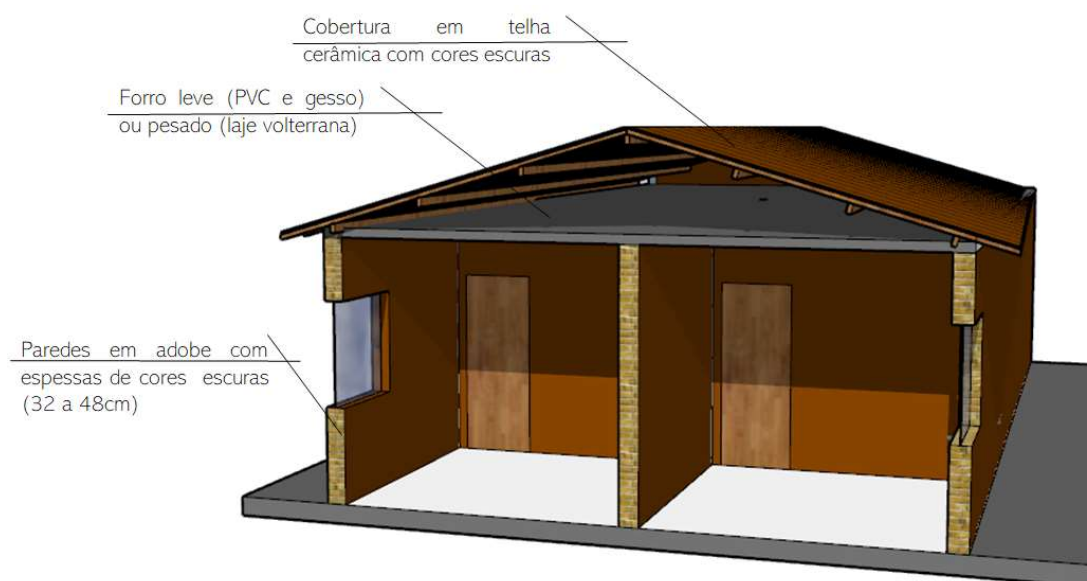


Figura 192 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 5

Para a **zona bioclimática 7**, por apresentar um clima seco, árido e quente, conclui-se que o edifício necessita de uma envoltória de cores claras para refletir a maior quantidade de calor. E pelo fato de apresentar maior calor do que frio, a inércia térmica não se apresenta como uma estratégia necessária. A partir de uma análise individual dos componentes da envoltória, paredes e coberturas, verifica-se um moderado percentual de conforto para as coberturas e um baixo percentual para as paredes.

Ao variarmos as espessuras e absorvâncias de paredes em um modelo sem forro, chegamos a percentuais muito baixos de conforto anual de 32 a 33%; quando distribuídos ao longo dos meses, chega-se a valores entre 31 a 68%. Na variação das coberturas com forro com $\alpha \geq 0,2$, mantendo as paredes do modelo de referência com 17,0 cm e cor branca, o percentual de conforto anual foi similar de 88%. e quando distribuído ao longo dos meses, variou de 100 a 75% (Tabela 68 e Figura 193).

Tabela 68– Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 7.

Parâmetros		Percentual de conforto mensal	Percentual de conforto mensal anual
Coberturas	forro + $\alpha \geq 0,2$	70 a 100%	88%
	Forro PVC com $\alpha \geq 0,4$ + isolamento		
Paredes	17 a 48m com $\alpha \geq 0,2$	31 a 68%	32 a 33%

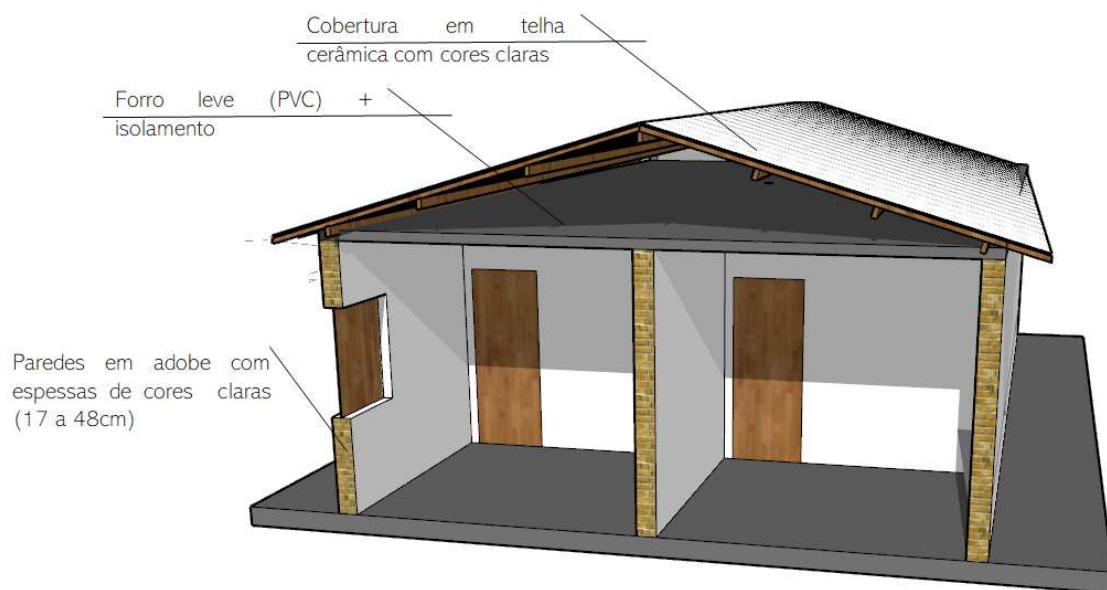


Figura 193 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 7.

A partir de uma análise individual dos componentes da envoltória na **zona bioclimática 8**, verifica-se que as paredes e coberturas apresentam um elevado percentual de conforto. Ao variarmos as espessuras e absorções das paredes em um modelo sem forro, chegamos a percentuais muito baixos de conforto anual de 34 a 53% e quando distribuídos ao longo dos meses, a valores de 45 a 74%. Na variação das coberturas com forro com $\alpha \geq 0,2$ ou com forros leves com $\alpha \geq 0,4$, mantendo as paredes do modelo de referência com 17,0cm e cor branca, o percentual de conforto anual foi de 94 a 100% (Tabela 69 e Figura 194).

Tabela 69 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 8.

Parâmetros		Percentual de conforto mensal	Percentual de conforto mensal anual
Coberturas	forro + $\alpha \geq 0,2$	83 a 100%	94 a 100%
	PVC com $\alpha \geq 0,40$		
Paredes	17 a 48cm com $\alpha \geq 0,4$	45 a 74%	34 a 53%

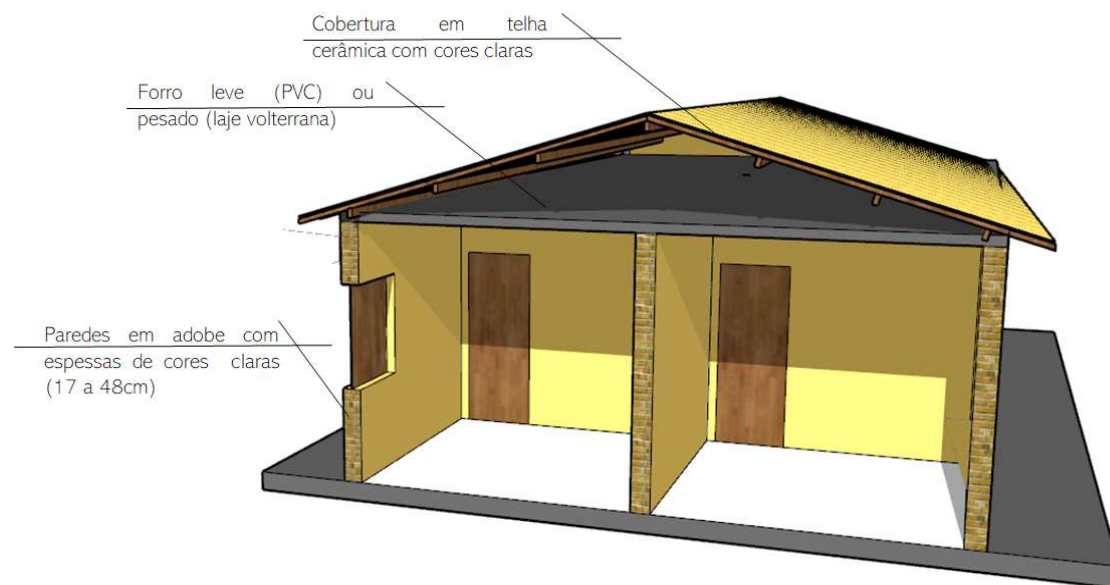


Figura 194 – Parâmetros para envoltória de edificações - zona bioclimática 8

Depois destas análises pode-se concluir que:

- Para a zona 5 será necessário realizar novas simulações combinando paredes escuras e espessas com coberturas pesadas com cores escuras para se determinar o percentual de conforto.
- Nas zonas 7 e 8, o uso de paredes esbeltas de 17cm e $\alpha = 0,2$, que compõem o modelo de referência, apresentaram as melhores soluções. Porém, será também necessário averiguar a possibilidade de ampliar esse parâmetro para outras espessuras e absortâncias de paredes, considerando que para esta zona a variação dos parâmetros das paredes com o modelo sem forro pareceu não apresentar fortes influências sobre os modelos.

A partir destas constatações foram feitas novas simulações para validar os parâmetros no item seguinte.

9. VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DOS MATERIAIS DA ENVOLTÓRIA

Os parâmetros para os materiais da envoltória, como cores, espessura das paredes e tipos de forro, foram validados em duas etapas:

- i) **validação dos materiais:** avaliação das combinações dos melhores parâmetros dos materiais para paredes e coberturas para cada zona bioclimática, utilizando-se o modelo arquitetônico 1, já estudado nos subcapítulos anteriores;
- ii) **validação do modelo:** desenvolvimento de um novo modelo arquitetônico com 2 dois quartos, gerando uma nova tipologia, e utilizando-se os parâmetros validados para envoltória

O modelo 1 consiste em uma habitação térrea na tipologia PMCMV com 65m² distribuídas nos seguintes cômodos: 03 quartos, sala, cozinha, área de serviço e 1 banheiro. O pé direito apresenta 2,40m. Este modelo já foi avaliado anteriormente (Figura 195). A cobertura é composta por telha cerâmica com forros variados de acordo com a zona bioclimática, que o mesmo se insere, estes detalhes serão aprofundados no subcapítulo 9.1. As paredes são compostas por alvenaria de adobe e rebocadas com cal com espessuras e pinturas de cores de acordo com cada zona.



Figura 195 – perspectiva modelo 1



Figura 196 – planta baixa modelo 1

A tipologia 2, também, segue as recomendações do PMCMV em termos de materiais, apresentando uma área de 39,82m², composta de sala, cozinha, 1 banheiro e 2 quartos (Figura 197 e Tabela 70). Os materiais da cobertura e parede seguem as mesmas combinações do modelo

1, que apresenta 3 quartos, para cada zona bioclimática, de modo avaliarmos as soluções em um modelo 2 quartos. O detalhamento dos materiais segue na sequência no subcapítulo 9.1.

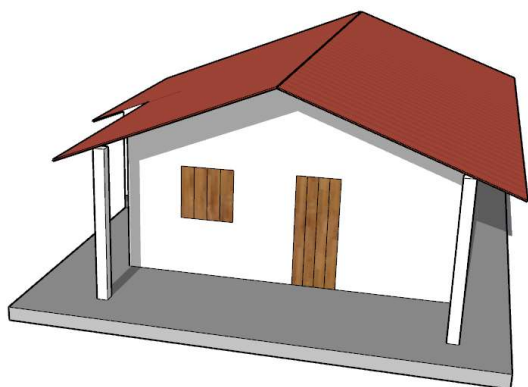


Figura 197 – perspectiva modelo 2



Figura 198 – planta baixa modelo 2

Tabela 70 – Modelos térmicos PMCMV em adobe

	Modelo 1	Modelo 2
Tipologia	3 quartos	2 quartos
Área	75 m ²	55,83m ²
Pé direito	2,40m	2,77m

9.1. VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DOS MATERIAIS DA ENVOLTÓRIA

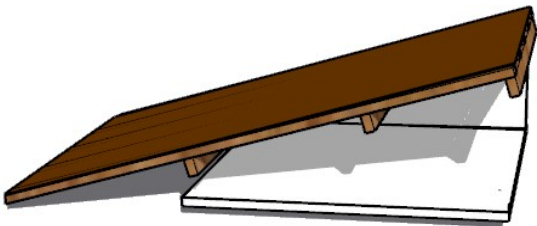
A partir das recomendações de absorvância, espessuras de paredes e tipos de forro apontadas para no subcapítulo 2.3.1.4. recomendações para envoltória, foram construídos modelos específicos para cada zona bioclimática, simulados na plataforma Energy Plus. Quando as combinações sugeridas não atingiram pelo menos 80% de média mensal, o modelo foi simulado novamente com novas variáveis, restabelecendo-se os parâmetros.

9.1.1. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

Na zona 5 foram avaliados os comportamentos de dois modelos:

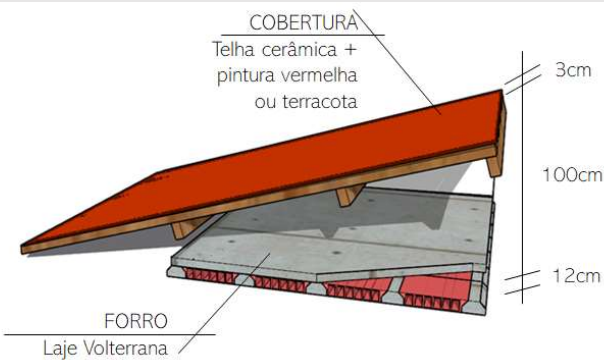
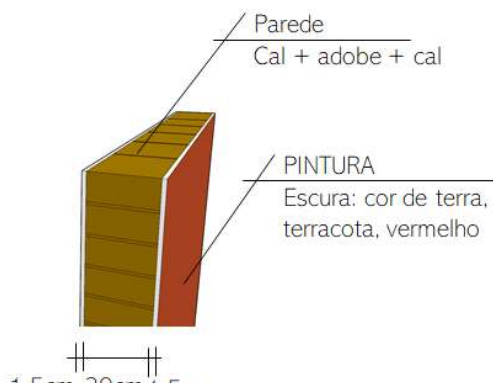
- O **modelo 5.1** com cobertura e paredes escuras com $\alpha = 0,9$, forro PVC sem isolamento e paredes com 32cm. O forro PVC foi escolhido para servir como parâmetro limite, por apresentar os piores resultados entre os tipos de forro (ver Tabela 71).

Tabela 71 – Propriedades térmicas do modelo 5.1.1.

COBERTURA	
	telha cerâmica ($e = 3\text{cm}$) sem isolamento cor natural + forro PVC.
	$\alpha = 0,90$
	$U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$
	$CT = 21,04 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$
PAREDES	
	Reboco de cal ($1,5\text{cm}$) + adobe ($e = 29\text{cm}$) + reboco de cal ($1,5\text{cm}$).
	$\alpha = 0,90$
	$U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$
	$CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$

- O **modelo 5.2** com cobertura e paredes escuras com $\alpha = 0,75$, laje sem isolamento e paredes com 32cm. O modelo 5.2 busca avaliar as contribuições do uso da laje para o aumento dos valores de absorções, possibilitando uma maior gama de cores (ver Tabela 60).

Tabela 72 – Propriedades térmicas do modelo 5.1.2.

COBERTURA	
 COBERTURA Telha cerâmica + pintura vermelha ou terracota 3cm 100cm 12cm FORRO Laje Volterrana	telha cerâmica (e = 3cm) sem isolamento cor natural + laje volterrana. $\alpha = 0,75$ $U = 1,74 \text{ m}^2.K$ $CT = 394 \text{ kJ/m}^2.K$
PAREDES	
 Parede Cal + adobe + cal PINTURA Escura: cor de terra, terracota, vermelho 1.5cm 29cm 1.5cm	Reboco de cal (1,5cm) + adobe (e = 29cm) + reboco de cal (1,5cm). $\alpha = 0,75$ $U = 1,75 \text{ m}^2.K$ $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.K$

O modelo 5.1 atingiu um conforto média anual de 85%, gerando um desconforto por frio de 15% e nenhum desconforto por calor. Estes percentuais, distribuídos ao longo dos meses, geraram médias que oscilam de 93% em agosto a 74% em julho. Os meses de julho e outubro foram os únicos meses que apresentaram índices de desconforto abaixo de 80%. O baixo desconforto apresenta motivações diferentes, o mês de julho apresenta o pior desconforto por frio, com índice de 26%, e outubro o pior desconforto, por calor com percentual de 22% (Figura 199).

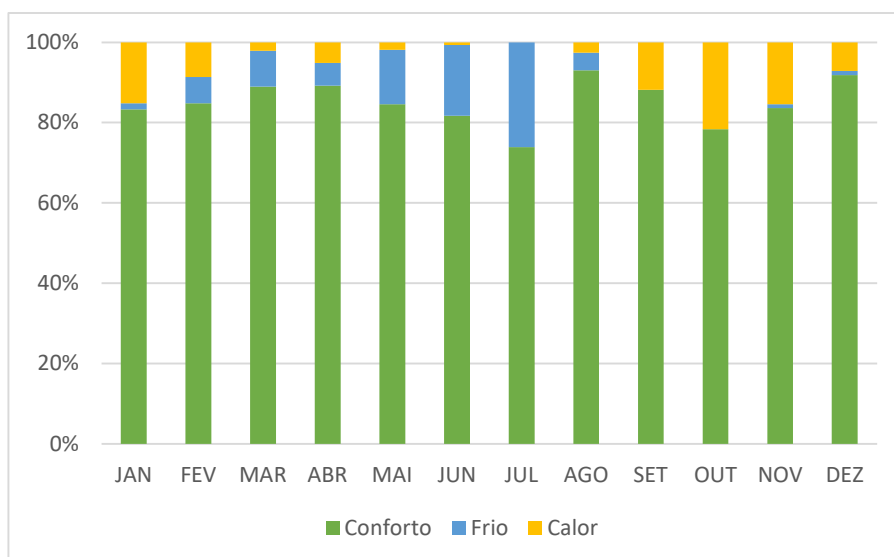


Figura 199 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 5.1

O modelo 5.2 atingiu um conforto anual médio de 88%, gerando um desconforto por frio de 12% e nenhum desconforto por calor. Estes percentuais distribuídos ao longo dos meses, geram médias que oscilam de 67% em julho e 97% em setembro. Os meses de junho e julho foram os únicos meses que apresentaram índices de conforto abaixo de 80%, devido ao elevado desconforto por frio (Figura 200).

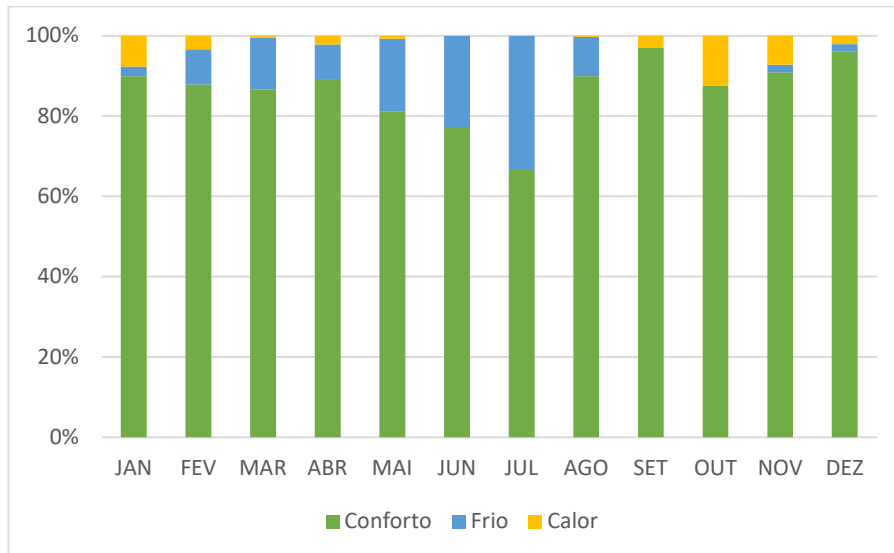
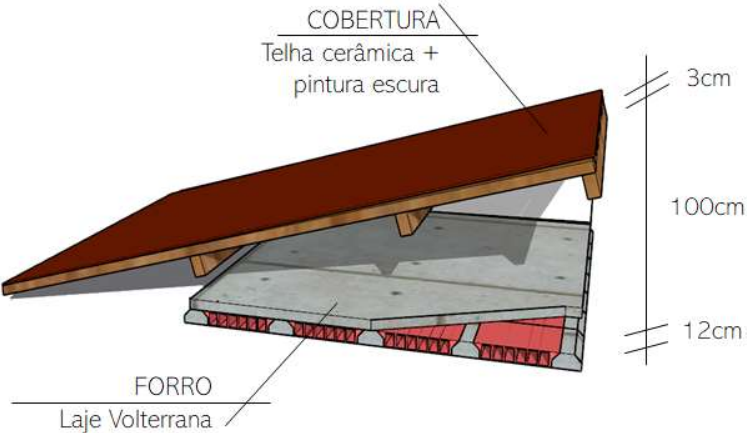


Figura 200 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 5.2.

Apesar de os modelos 5.1. e 5.2. apresentarem um percentual de conforto anual razoável, isto é, acima de 80%, na média mensal, ambos apresentam 1 a 2 meses abaixo desse percentual. Desse modo, realizou-se uma nova simulação com modelo 5.2.1, com laje volterrana, $\alpha = 0,90$ e paredes com $e=32\text{cm}$ e $\alpha = 0,90$ (Tabela 73).

Tabela 73 – Propriedades térmicas do modelo 5.1.2.

COBERTURA	
 COBERTURA Telha cerâmica + pintura escura FORRO Laje Volterrana 3cm 100cm 12cm	telha cerâmica ($e = 3\text{cm}$) sem isolamento cor natural + laje volterrana. $\alpha = 0,90$ $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 394 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$
PAREDES	
 Parede Cal + adobe + cal PINTURA Escura: marrom, azul escuro e verde escuro. 1,5cm 29cm 1,5cm	Reboco de cal (1,5cm) + adobe ($e = 29\text{cm}$) + reboco de cal (1,5cm). $\alpha = 0,90$ $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$

Esse modelo apresentou um comportamento similar ao modelo 5.1., com um conforto anual a atingir 85% e com valores mensais que em sua maioria se encontrando acima de 80%, com exceção dos meses de julho e outubro, que apresentaram percentuais mensais de 77 e 76% (Figura 201).

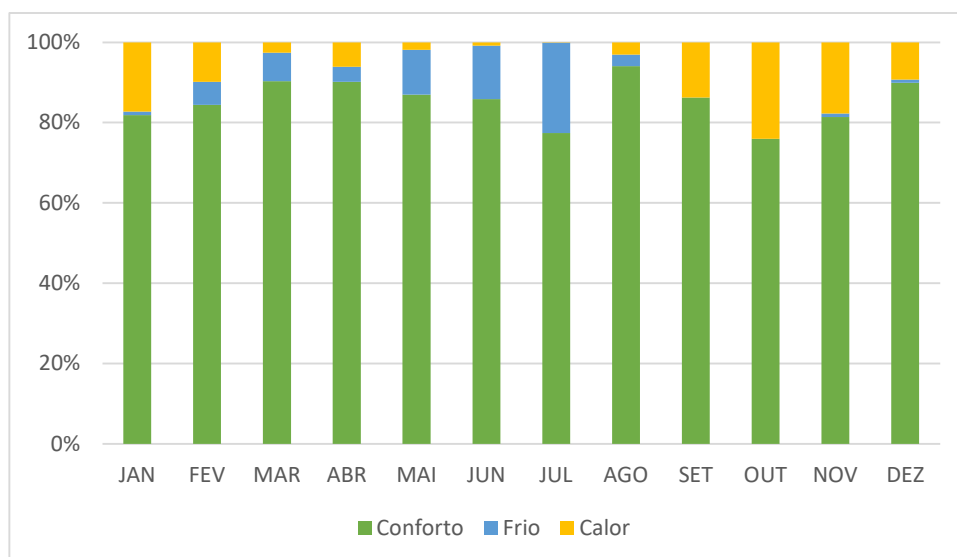


Figura 201 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 5.2.1.

A partir das variáveis analisadas no nível dos materiais de envoltória, sugere-se a aplicação de outras **estratégias** apontadas pela NBR 15220 (ABNT 2005), como (Figura 202):

- ventilação seletiva no período noturno durante os meses de setembro a janeiro, por serem os períodos mais quentes.
- Já no período frio, de março a agosto, recomenda-se abrir as esquadrias ou de preferência utilizar esquadrias de vidro de modo a captar o calor diurno e fechar as esquadrias no período noturno para acumular o calor.
- As estratégias devem estar associadas às coberturas e paredes de cores escuras, coberturas com forro e paredes espessas,

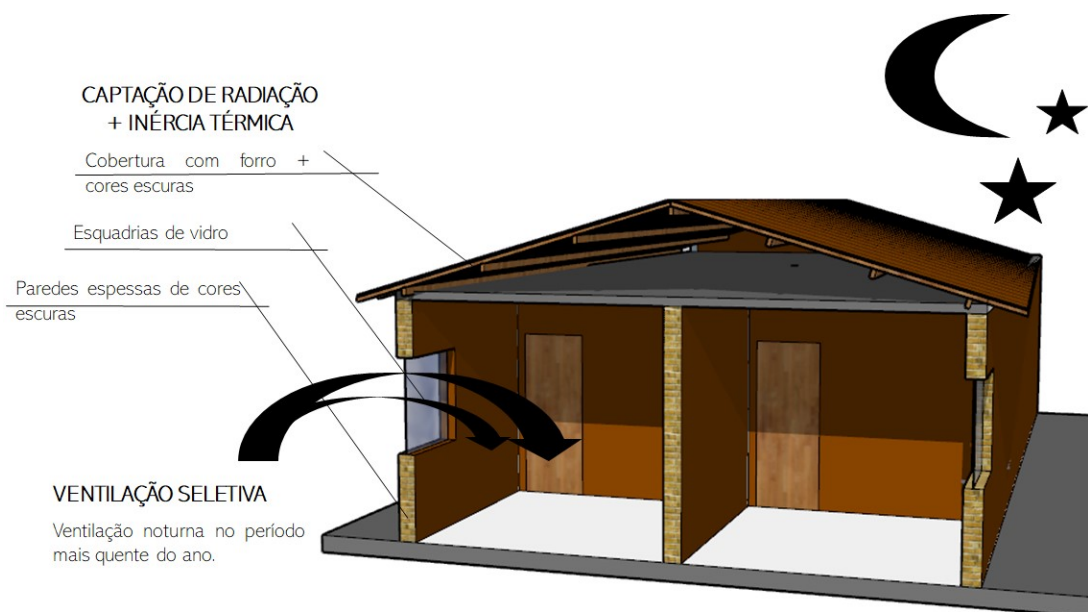


Figura 202 – Recomendações térmicas para construções em adobe para a zona bioclimática 5.

9.1.2. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

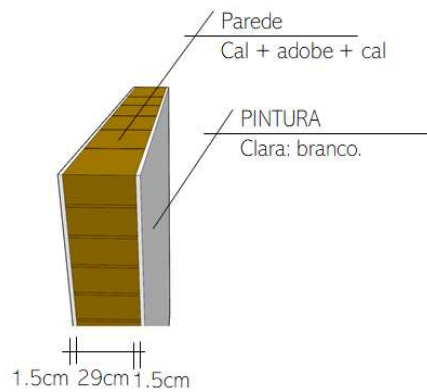
Na zona 7 foram avaliados os comportamentos de dois modelos 7.1.1 e 7.1.2:

O modelo 7.1 foi modelado com uma cobertura clara com $\alpha = 0,2$, laje com isolamento e paredes com $e = 32\text{cm}$ e $\alpha = 0,4$ (Tabela 74).

Tabela 74 – Propriedades térmicas do modelo 7.1.1.

COBERTURA	
COBERTURA Telha cerâmica + pintura clara FORRO Laje Volterrana + isolamento 3cm 100cm 5cm 12cm	telha cerâmica ($e = 3\text{cm}$) com isolamento + laje volterrana. $\alpha = 0,20$ $U = 0,58 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 39,13 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$

PAREDES



Reboco de cal (1,5cm) +
adobe ($e = 29\text{cm}$) + reboco
de cal (1,5cm).

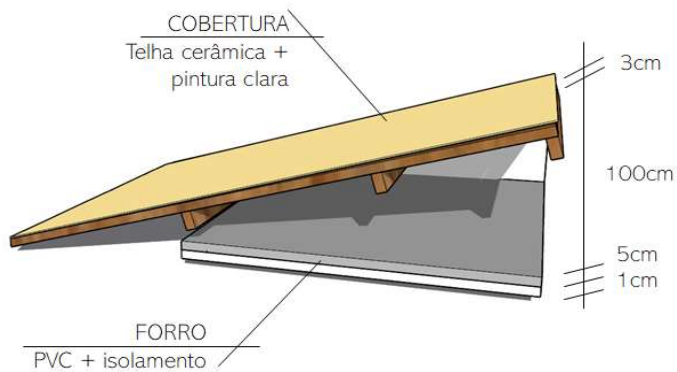
$$\alpha = 0,20$$

$$U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$$

$$CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$$

O modelo 7.2, com cobertura clara com $\alpha = 0,4$, forro PVC com isolamento e paredes com $e = 32\text{cm}$ e $\alpha = 0,4$ (Tabela 75).

Tabela 75 – Propriedades térmicas do modelo 7.1.2



telha cerâmica ($e = 3\text{cm}$)
com isolamento + forro
PVC.

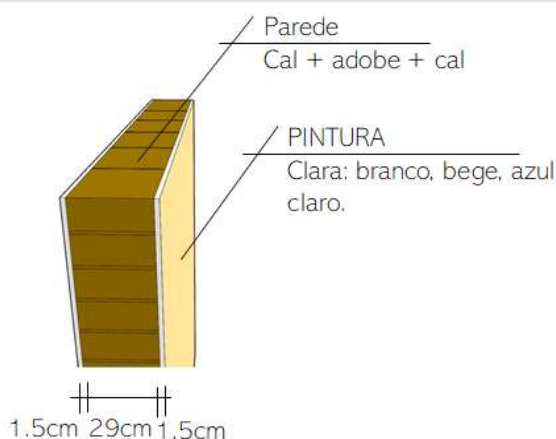
$$\alpha = 0,40$$

$$U = 0,58 \text{ m}^2.\text{K}$$

$$CT = 27,53 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$$

2.

PAREDES



Reboco de cal (1,5cm) + adobe (e = 29cm) + reboco de cal (1,5cm).

$$\alpha = 0,40$$

$$U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$$

$$CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$$

O modelo 7.1., com uma envoltória clara $\alpha = 0,2$, cobertura de forro PVC com isolamento com uma parede com espessura de 32cm, atingiu um conforto anual médio de 96%, gerando um desconforto por frio de 0% e um pequeno desconforto por calor de 4%. Esses percentuais, distribuídos ao longo dos meses, geram médias elevadas acima de 90% em quase todos os meses, sendo o mês de novembro aquele que apresenta um média de 87% (Figura 203).

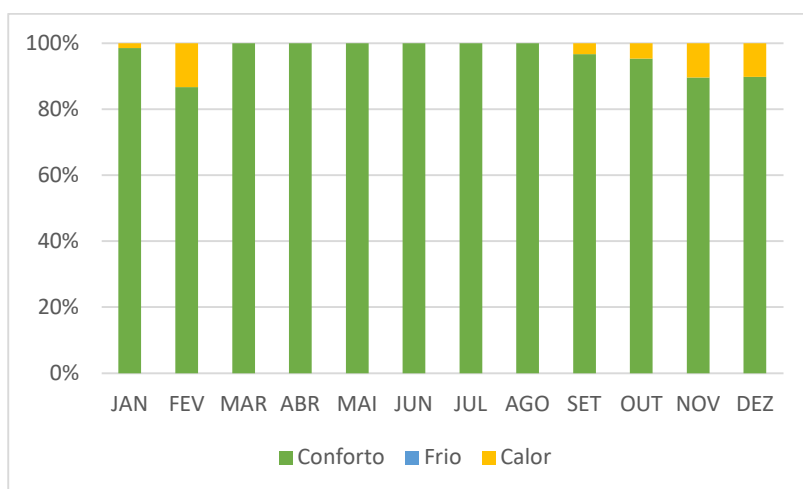


Figura 203 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 7.1.1.

O modelo 7.2 apresentou resultado anual muito bom, de 92% de conforto e 8% de desconforto por calor. Em quase todos os meses apresentou resultados satisfatórios, porém, no mês de novembro atingiu valores abaixo de 80% com 76% de conforto (Figura 204).

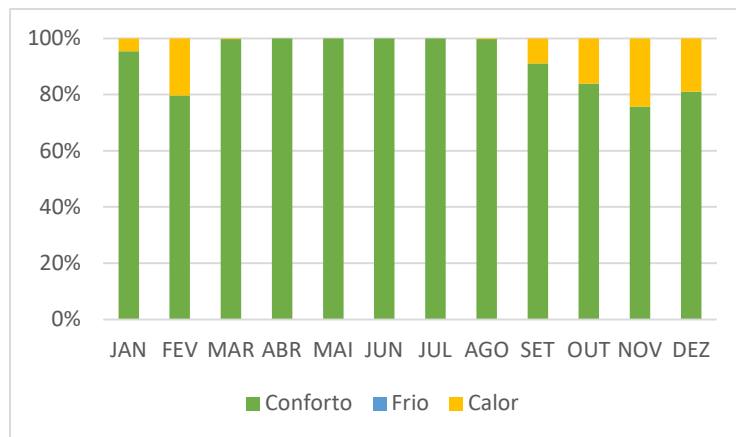


Figura 204 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 7.2.1.

A partir das variáveis analisadas no nível dos materiais de envoltória, sugere-se a aplicação de outras **estratégias** como (Figura 205).:

- ventilação seletiva no período de setembro a fevereiro, por serem os períodos mais quentes
- A ventilação do ático pode reduzir a necessidade do isolamento.
- Segundo a NBR 15775 (ABNT, 2005), a ventilação para zona bioclimática 7 deve ser feita com sombreamento das esquadrias, evitando a entrada de radiação direta nos cômodos.
- Outra estratégia que cabe diretamente no modelo arquitetônico é o uso de pátios internos, de modo garantir a umidificação do ar.

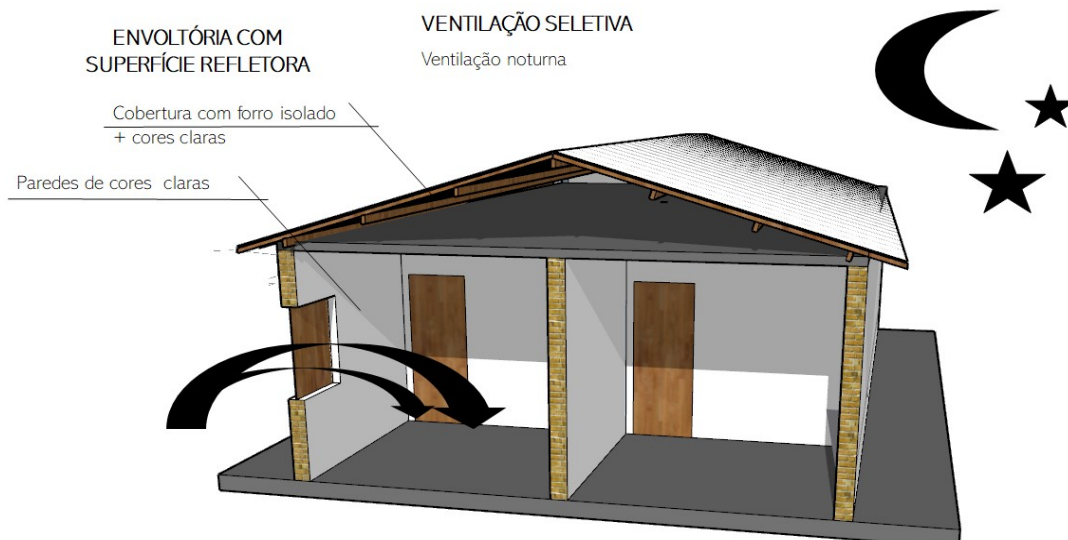
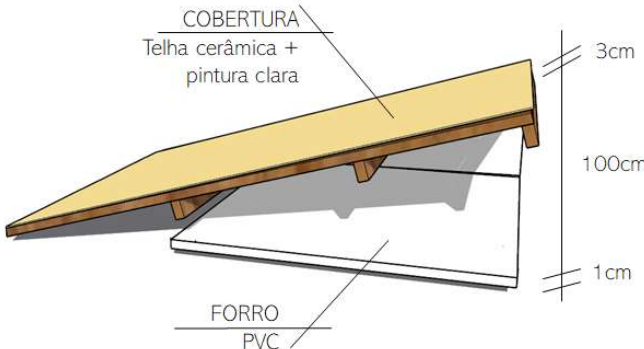
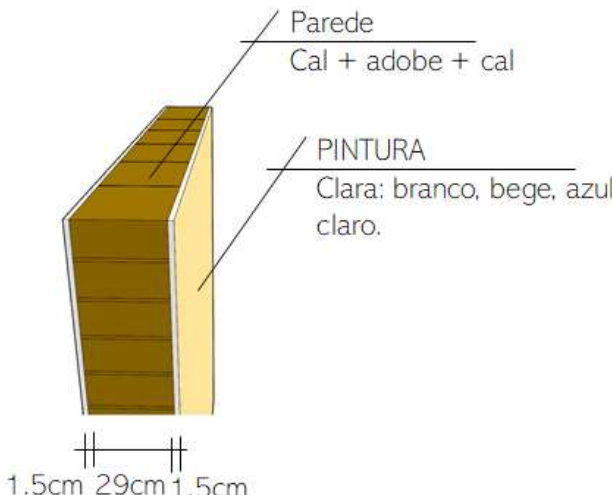


Figura 205– Recomendações térmicas para construções em adobe para a zona bioclimática 5.

9.1.3. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

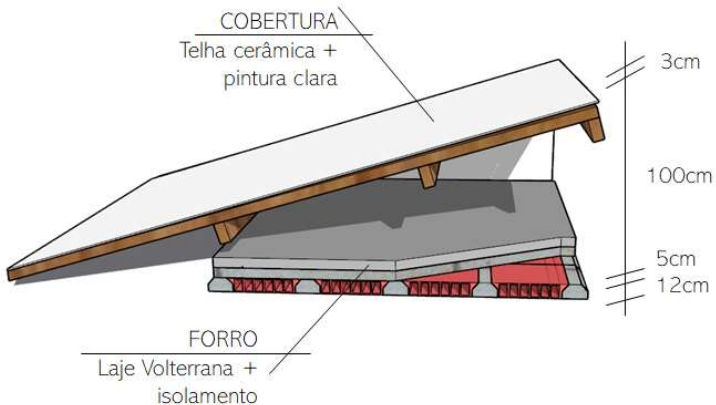
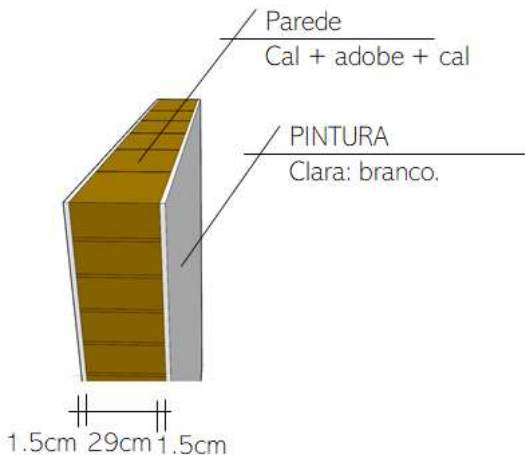
Na zona 8, optou-se por avaliar dois modelos distintos. O modelo 8.1.1, com cobertura de telha cerâmica, $\alpha = 0,4$ e forro PVC sem isolamento, o que representa componentes leves com $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 21,04 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. E paredes com $e = 32\text{cm}$ e $\alpha = 0,4$, representando paredes pesadas de $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Tabela 75).

Tabela 75 – Propriedades térmicas do modelo 8.1.1.

COBERTURA	
	telha cerâmica ($e = 3\text{cm}$) sem isolamento + forro PVC. $\alpha = 0,40$ $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 21,04 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$
PAREDES	
	Reboco de cal ($1,5\text{cm}$) + adobe ($e = 29\text{cm}$) + reboco de cal ($1,5\text{cm}$). $\alpha = 0,40$ $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$

O modelo 8.1.2, por sua vez, detém uma cobertura de telha cerâmica pela laje voltterrana com $\alpha = 0,2$, representando componentes pesados de $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 394 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. E paredes de adobe com 32cm e $\alpha = 0,2$; representando paredes pesadas de $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Tabela 76).

Tabela 76 – Propriedades térmicas do modelo 8.1.2.

COBERTURA	
 COBERTURA Telha cerâmica + pintura clara FORRO Laje Volterrana + isolamento 3cm 100cm 5cm 12cm	telha cerâmica (e = 3cm) sem isolamento + laje volterrana $\alpha = 0,20$ $U = 1,74 \text{ m}^2.K$ $CT = 394 \text{ kJ/m}^2.K$
PAREDES	
 Parede Cal + adobe + cal PINTURA Clara: branco. 1.5cm 29cm 1.5cm	Rreboco de cal (1,5cm) + adobe (e = 29cm) + reboco de cal (1,5cm). $\alpha = 0,20$ $U = 1,75 \text{ m}^2.K$ $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.K$

O modelo 8.1.1 apresentou uma média de 94% de conforto. Quando se analisa aos longos dos meses, verifica-se que de março a setembro os modelos apresentam os percentuais mais elevados próximos a 100%. Durante o resto do ano a média mensal sempre se encontra acima de 80% (Figura 206).

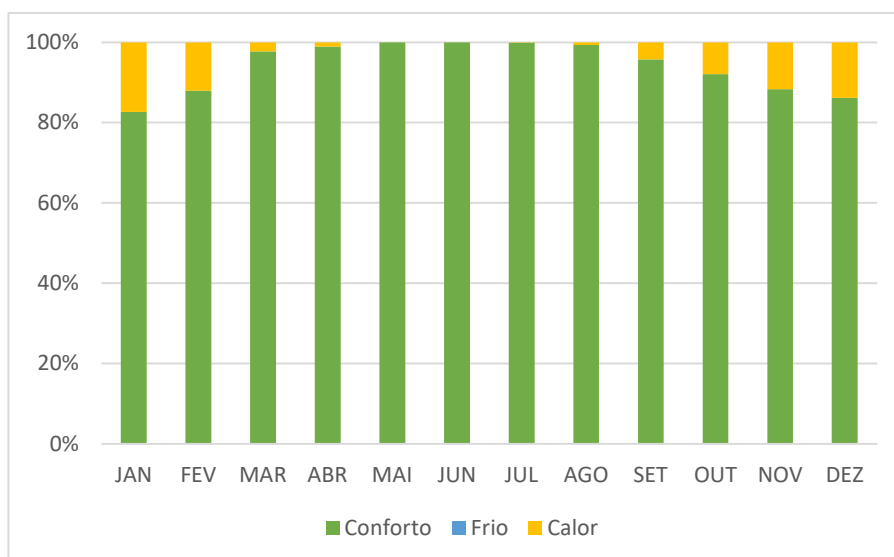


Figura 206 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 8.1

O modelo 8.1.2 apresentou um comportamento com percentuais de conforto mais elevados do que o modelo 8.1. O conforto anual foi de 100%, cujas médias mensais ou atingiram 100% ou ficaram em 98%. O desempenho se deve pelo uso de coberturas com baixa absorção (Figura 207).

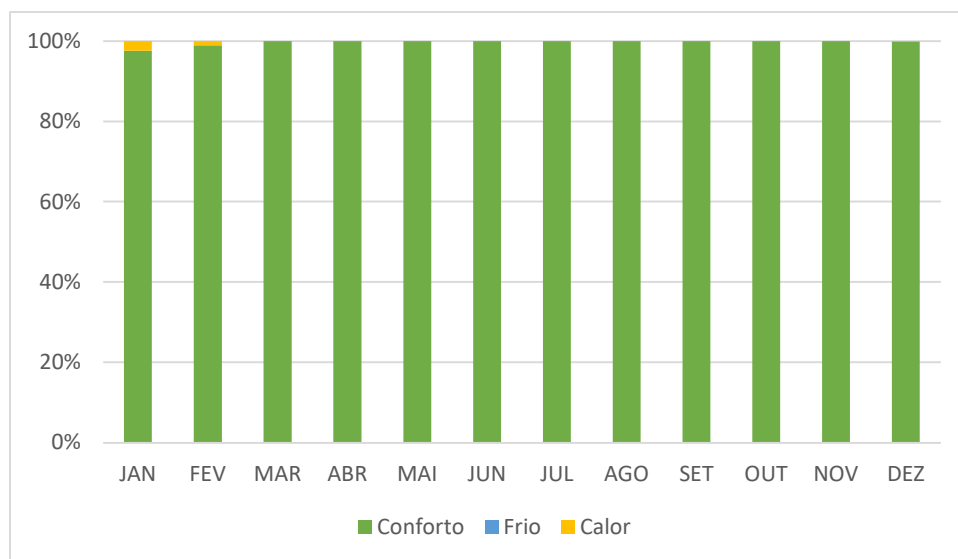


Figura 207 – Média mensal do conforto e desconforto do modelo 8.2

Para a zona 8 as **estratégias** são as seguintes:

- Apesar de ser quente, não necessita de isolamento na cobertura para atingir um bom percentual de conforto.

- Em termos de coberturas se faz necessário somente o uso de coberturas claras e com forro, leves ou pesados.
- No caso das paredes de adobe, as espessuras não têm influência direta, podendo se utilizar quaisquer espessuras, porém, as paredes devem ser claras.
- A envoltória de cores claras permite uma maior reflexão do calor sobre a superfície.
- Quanto à ventilação, acredita-se que o uso da constante com esquadrias sombreadas como recomenda a NBR 15575 pode reduzir os parâmetros para os valores de absortâncias (Figura 208).
- O uso de ventilação no forro, como recomenda a NBR 1575 (ABNT 2013b), pode ser uma alternativa para possibilitar o uso de cores mais escuras da envoltória, possibilitando aumentar uma gama de cores (esse estudo não foi realizado devido às limitações da plataforma Energy Plus, que não permite realizar com precisão as variações da ventilação e o uso de outra plataforma tornaria a pesquisa inviável, em termos de tempo).

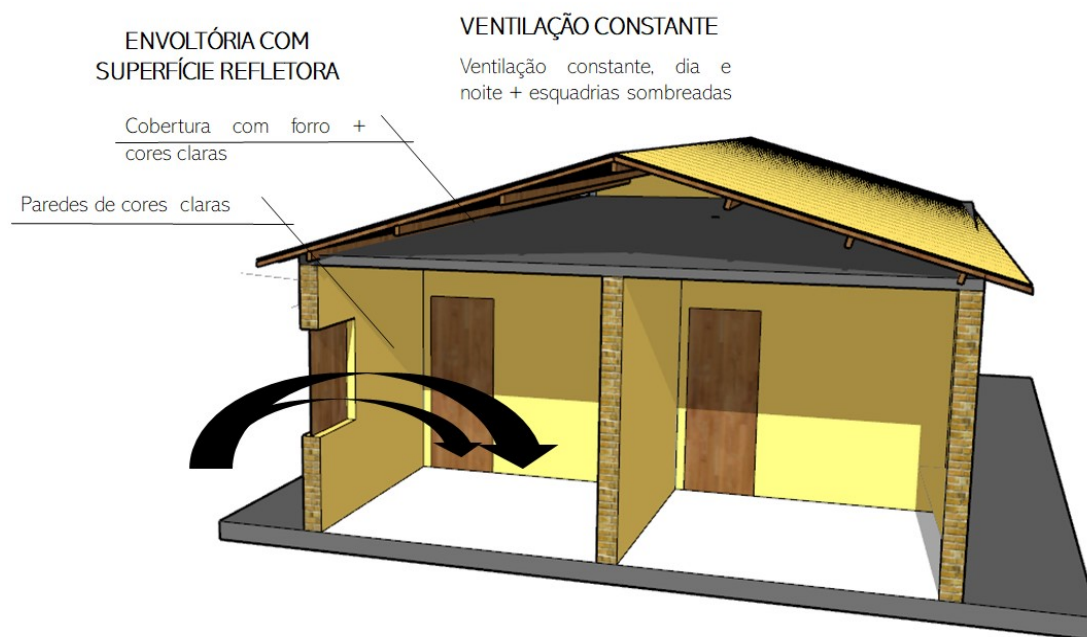


Figura 208 – Recomendações térmicas para construções em adobe para a zona bioclimática 8.

9.1.4. SÍNTESE

A partir do incremento realizado na envoltória do modelo padrão PMCMV do Ceará nos modelos de acordo com a necessidades de cada zona bioclimática, verificou-se que as recomendações do programa habitacional direcionadas para Ceará não são adequadas, pois não apresentam um desempenho de conforto satisfatório e as propriedades térmicas da envoltória não atendem as

recomendações da NBR 15575 para o desempenho térmico nas zonas 5, 7 e 8. O sistema atualmente adotado constitui-se por coberturas sem forro com $U = 4,55 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 18 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e $\alpha = 0,75$ e paredes alvenaria de tijolo cerâmico com $U = 2,22 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 144,62 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e $\alpha = 0,2$ (Figura 209).

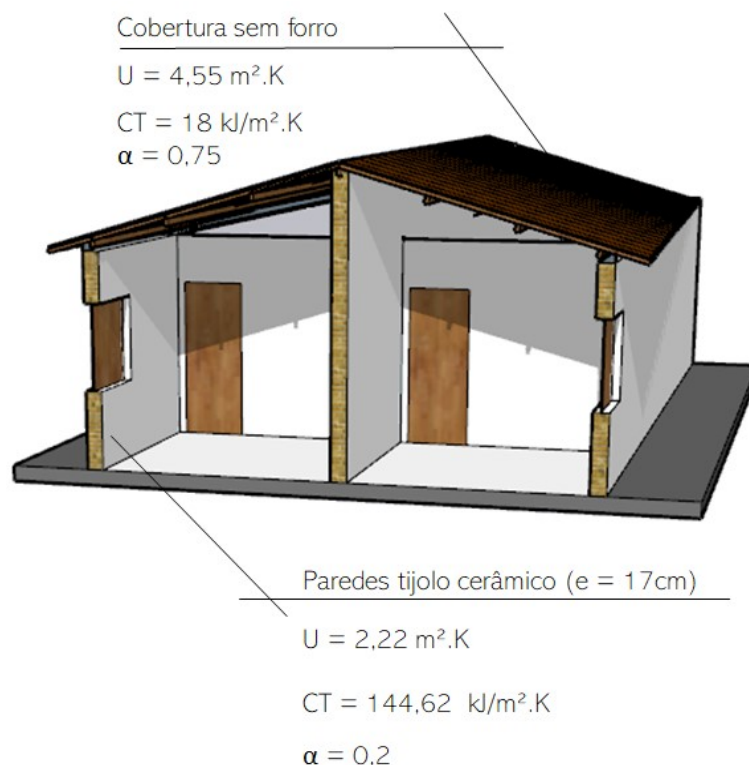


Figura 209 – Propriedades térmicas do modelo padrão PMCMV

Com as melhorias propostas para as coberturas e paredes foi possível atingir valores razoáveis para cada zona bioclimática, sendo a zona 8, aquela que apresentou os melhores resultados. Acredita-se com o incremento de outras variáveis não analisadas neste trabalho (por uma questão de limitação temporal) será possível atingir os melhores resultados para as zonas 5, 7 e 8:

Na **zona 5** a média mensal de conforto atinge no máximo 29%, apresentando um elevado desconforto por frio, variando de 66 a 78%, enquanto o desconforto por calor é irrelevante. Por sua vez, no modelo adaptado a zona bioclimática 5 inserimos um forro de laje volterrana e aumentamos a absorvância da envoltória para 0,75 e aumentamos a espessuras das paredes, gerando uma cobertura de $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$, $CT = 394 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e paredes de $U = 1,75$, $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Figura 210). A alteração das propriedades da envoltória nos permitiu atingir valores de conforto bem mais elevados de 76 a 90%. Ao mesmo tempo que reduzimos o desconforto por frio que apresentou uma média de 0 a 22%. Porém, gerou-se um leve aumento do desconforto por

calor em determinada época do ano, com médias de 0 a 24%. Este fenômeno pode ser corrigido se utilizarmos recursos como ventilação natural para retirada do calor, quando necessária. Ao mesmo tempo, o uso de esquadrias de vidro para acumular mais calor nos períodos frios (estas estratégias não serão avaliadas nesta pesquisa, serão somente recomendações para trabalhos futuros). Ao mesmo tempo que a média anual de conforto, comparando o modelo padrão e o adaptado, observa-se que o modelo teve um crescimento de 29% para 90% de conforto.

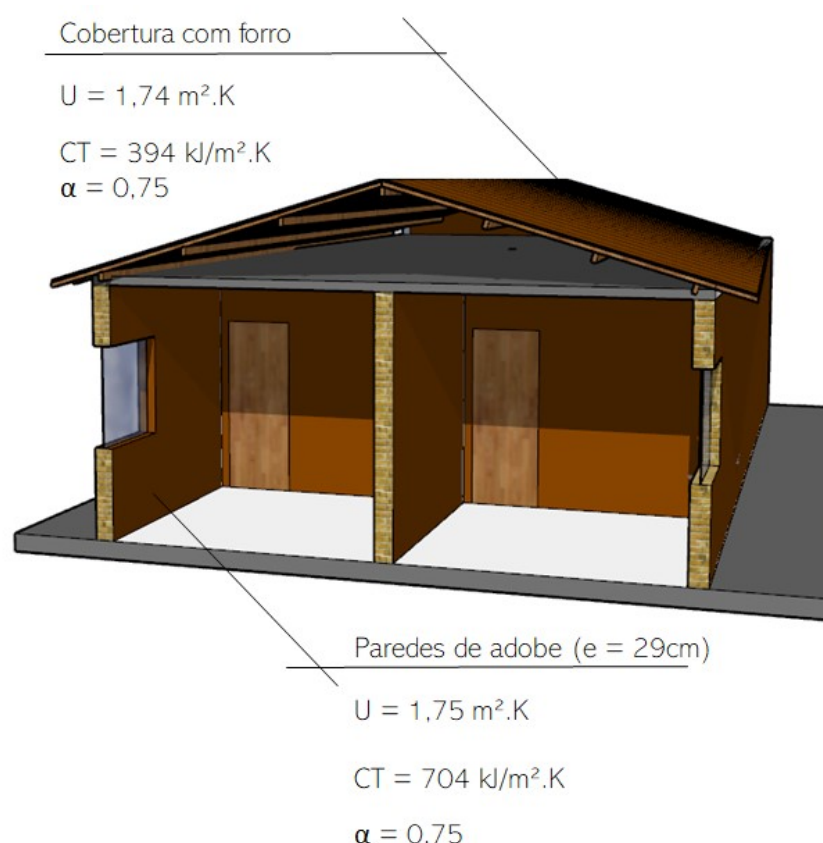


Figura 210 – Propriedades térmicas do modelo PMCMV adaptado a zona bioclimática 5.

Na **zona 7**, o modelo padrão PMCMV apresentou uma média mensal de conforto de 29 a 47% a depender da época do ano. Por sua vez, o desconforto por calor é bem elevado com médias mensais de 41 a 71% e o desconforto por frio irrelevante. Ao refinarmos o modelo, construindo um modelo adaptado à zona 7, inserindo um forro de leve em gesso ou PVC com isolamento térmico e telhas com baixa absorção, $\alpha = 0,2$; paredes de adobe com baixa absorção, $\alpha = 0,2$ e espessuras variando de 0,17 a 0,48m, geramos coberturas com $U = 0,58 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 27,53 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ e paredes com $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Figura 198). A alteração das propriedades térmicas da envoltória provoca uma elevação da sua média mensal de conforto, passando a variar de 76 a 100%. Ao mesmo tempo que há uma drástica redução no desconforto

por calor com média mensal de 0 a 24%, o desconforto por frio desaparece. Acredita-se que, com o incremento de ventilação com aberturas sombreadas, é possível atingir valores de conforto mais elevados nos períodos mais quentes. O uso de ventilação do ático em substituição do isolamento poderá aumentar a média anual de 29% para 94% (Figura 211).

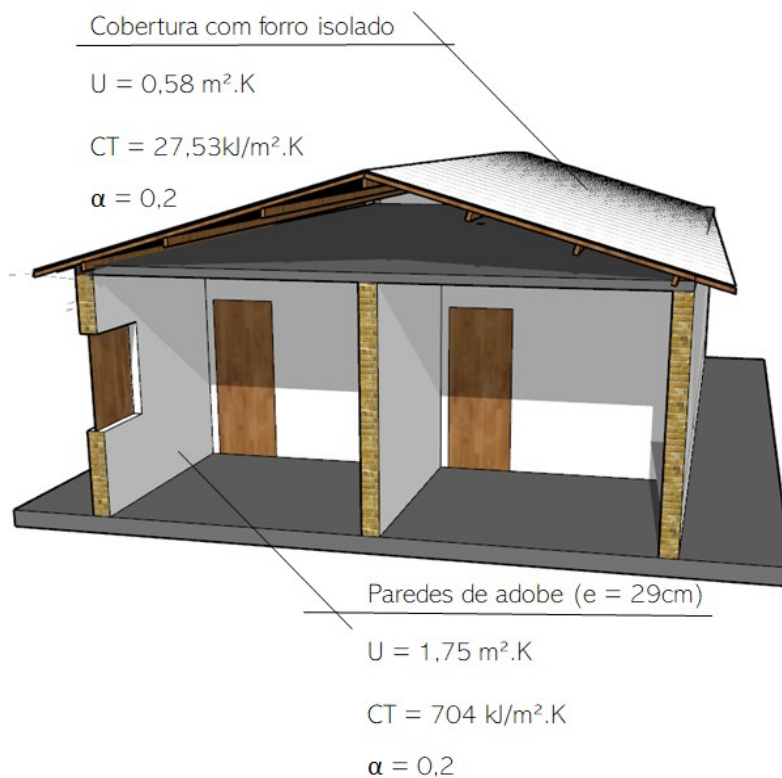


Figura 211 – Propriedades térmicas do modelo padrão PMCMV adaptado a ZB 7.

O modelo padrão na zona 8, a média mensal de conforto varia de 52 a 59%, apresentando um moderado desconforto por calor de 41 a 46% e um irrelevante desconforto por frio. Já o modelo adaptado, com forro leve de gesso, PVC ou laje volterrana e cobertura em telha cerâmica de $\alpha = 0,75$ e paredes de espessuras e $\leq 0,29\text{m}$ e $\alpha = 0,75$ apresentou propriedades como coberturas com $U=1,74 \text{ m}^2.K$ e $CT = 21,05 \text{ kJ/m}^2.K$ e paredes com $U = 1,75 \text{ m}^2.K$ e $CT = 7,04 \text{ kJ/m}^2.K$ que permitiram ótimas médias mensais (Figura 212). A alteração nas propriedades térmicas gerou elevadas médias mensais de conforto 94% a 100%, ao mesmo tempo que eliminou o desconforto de calor e frio. Quando se observa a média anual, percebe-se que o conforto do modelo saltou de 55% para 96%, quando se compara o modelo padrão com o modelo adaptado.

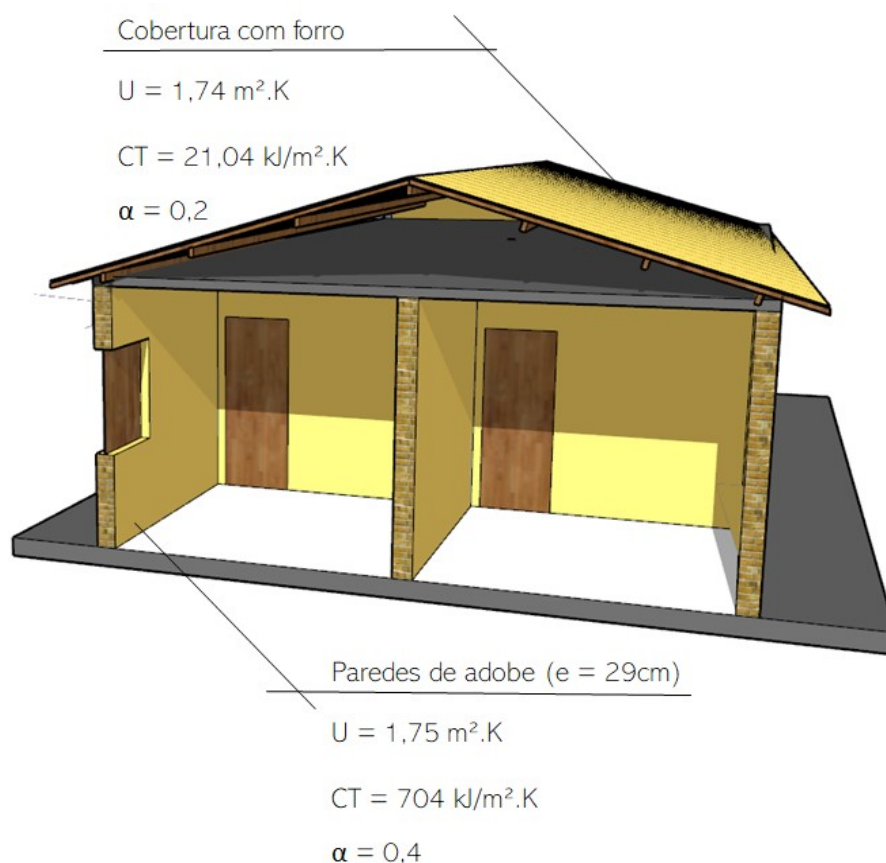


Figura 212 – Propriedades térmicas do modelo padrão PMCMV adaptado a ZB 8.

Ao realizarmos alterações das propriedades térmicas das coberturas e paredes sem alteração da geometria do modelo para cada zona específica no modelo padrão PMCMV, verificou-se que nas zonas 7 e 8, houve um aumento substancial da média de conforto anual, que no modelo padrão apresentava 29% e 55%, respectivamente, chegando a próximo de 100% em ambos os casos. Na zona 5, houve, também, um grande aumento, cuja média anual subiu de 28% para 88% (Figura 213).

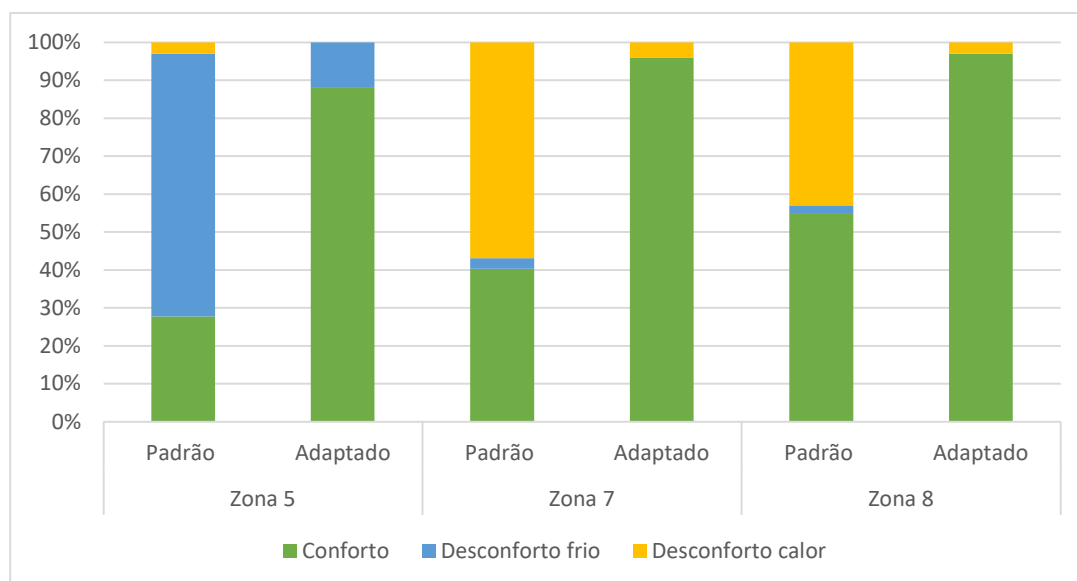


Figura 213– Média anual de conforto e desconforto térmico do modelo padrão e modelo adaptado.

Após as simulações realizadas, conclui-se que as **estratégias** para os componentes construtivos de uma edificação em adobe na zona bioclimática 5 difere das demais por agrupar cidades com climas mais úmidos e com baixas temperaturas. As demais zonas, 7 e 8, agrupam climas quentes e semiáridos ou úmidos com temperaturas elevadas.

A **zona bioclimática 5** detém um clima subúmido chuvoso tipo C2, com moderadas amplitudes térmicas e apresenta ao longo do ano mais desconforto por frio do que por calor. Assim, para a zona 5 recomenda-se:

- o uso de envoltória escura, como o marrom, para maior captação e calor, isto é, absorvências elevadas.
- Sugere-se também o uso de paredes com espessuras espessas e coberturas com forro de preferência do tipo pesados, com elevada capacidade térmica, de modo a garantir uma boa inércia térmica de aquecimento para o período diurno (Tabela 10).

A **zona 7**, por ser um clima seco, árido e quente, se enquadra na classificação tipo BSh e no tipo semiárido, segundo a classificação de Thornthwaite tipo D. A zona 7 necessita:

- de uma envoltória de cor clara, mais próxima a cor branca.
- As espessuras das paredes não têm importância quando se adotam essas cores, e podem ser espessas ou delgadas.
- Quanto à cobertura, se faz necessário o uso de quaisquer tipos de forro, leve ou pesado, com isolamento térmico (Tabela 77).

Já a **zona 8** se enquadra na classificação tropical com inverno seco tipo Aw e subúmido seco tipo C1. A zona 8 também necessita de:

- Paredes com cores claras com pigmentações mais próximas ao amarelo ou azul claro, com baixas absorptâncias.
- A espessura das paredes não tem forte influência quando elas apresentam cores claras.
- As coberturas devem ser de forro leve ou pesado, sem isolamento (Tabela 77).

Tabela 77 – Recomendações térmicas para paredes de adobe em habitação social.

ZB	Clima	Paredes de adobe	Coberturas
5	Tropical com inverno seco (Aw) e subúmido chuvoso (C2).	Paredes escuras com $\alpha \geq 0,75$; combinadas com paredes espessas com $e \geq 0,32\text{cm}$.	Cobertura escuras com $\alpha \geq 0,90$ com forro.
	Moderada amplitude térmica		Cobertura escuras com $\alpha \geq 0,75$ com laje volterana.
7	Clima seco, árido e quente (BSh) e semiárido (D)	Paredes claras com $\alpha \leq 0,20$.	Cobertura de cores claras com $\alpha \geq 0,2$ com forro isolado.
	Moderada amplitude térmica		
8	Tropical com inverno seco (Aw) e subúmido seco (C1)	Paredes claras com $\alpha \leq 0,40$.	Cobertura de cores claras com $\alpha \geq 0,4$ com forro.
	Baixa amplitude térmica		

9.2. VALIDAÇÃO GEOMÉTRICA DA ENVOLTÓRIA

Com intuito de validar novas possibilidades arquitetônicas desenvolveu-se o modelo 2 com 2 quartos, 1 sala, cozinha e banheiro com área 55,83m², seguindo os aspectos formais, construtivos e térmicos para construções em adobe enquadradas no PMCMV. Dentre as especificações construtivas, optou-se por:

- **cobertura** em telha cerâmica com forro, pois a única solução que atende as recomendações da NBR 15575 para as 3 zonas bioclimáticas do Estado do Ceará, assim como, foram as melhores soluções de coberturas avaliadas durante as simulações. Porém, o PMCMV recomenda o uso de coberturas em telha cerâmica sem forro para região Nordeste, pelo baixo custo e considerando que as cidades apresentam temperaturas elevadas.
- Quanto às **paredes** foram utilizadas a alvenaria de adobe rebocada com cal, único sistema construtivo tradicional do Estado do Ceará normatizado, já que o PMCMV considera que nas paredes é possível utilizar qualquer sistema construtivo desde que seja normatizado (CARVALHO, PAULA, and PEREIRA, 2017).
- Além destas especificações procurou-se atender outros requisitos não apontados pelo PMCMV, mas recomendados pelo NBR 15575 (ABNT, 2013) como transmitância, capacidade térmica e absorvância mínima.

Durante a modelagem considerou-se 4 zonas térmicas, pois unificamos a sala e cozinha, considerando uma única zona, considerando que os cômodos estão interligados pelo vão sem porta. Durante a análise, mesmo sendo modelada a zona térmica do banheiro, o seu comportamento não foi considerado, pois não é uma zona de permanência. As análises ocorreram em 3 cidades localizadas em zonas bioclimáticas distintas no Estado do Ceará, Guaramiranga, Crateús e Fortaleza, que representam as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8.

A **tipologia arquitetônica**, no quesito formal considerou-se uma edificação térrea com paredes estruturais de 0,32m para todas as zonas bioclimáticas em análise, por atender ao requisito estrutural e térmico. Quanto ao pé direito, determinou-se a altura de 2,77m do piso ao forro. Quanto ao vão estrutural, gerou-se cômodos com vãos de dimensão média entre 1,2 a 3,5m. (Figura 214 a Figura 216).

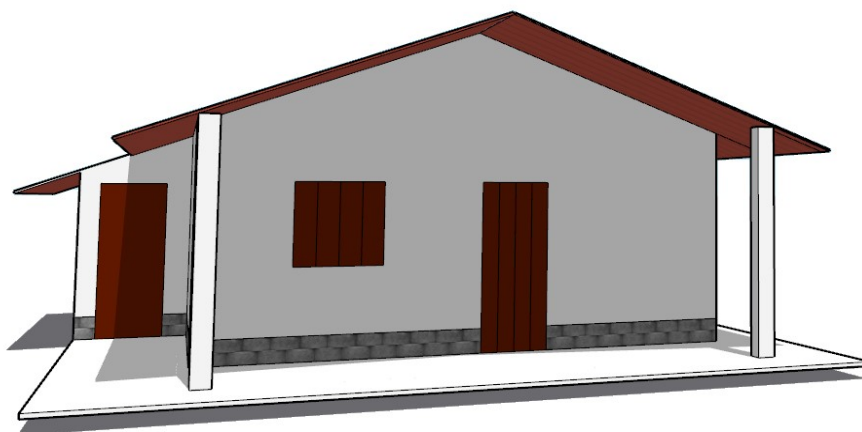


Figura 214 – Perspectiva modelo 2.



Figura 215 – Planta baixa modelo 2.

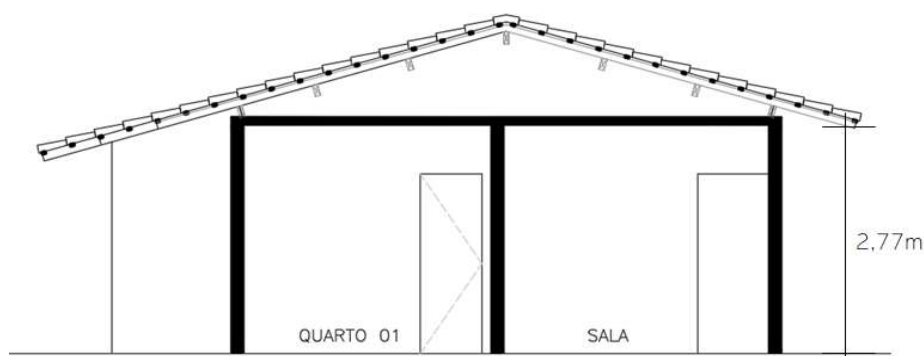


Figura 216 – Corte transversal modelo 2.

Quanto ao **sistema construtivo**, adotaram-se fundações em pedra e argamassa de cimento com baldrame com 30,0cm acima do solo. As paredes são de adobe dobradas com espessura de 29,0cm, assentados em argamassa de terra e rebocados com argamassa de cal e areia em ambas as faces com espessura de 1,5cm. Uso de paredes dobradas deu-se por motivos estruturais e térmicos. A norma de adobe, NBR 16814 (ABNT, 2019), recomenda paredes com espessuras mínimas de 20,0cm para fins estruturais com 1 pavimento. No quesito térmico, 29,0cm é o valor mínimo para atingir o conforto na zona bioclimática 5. Os vãos das esquadrias apresentam tamanhos máximos de 100,0cm e sobre eles foram utilizadas vergas de madeira com sobra de 20,0cm para cada lado. A cobertura sempre em telhas cerâmicas e forro (Figura 217 e Figura 218Figura 218).

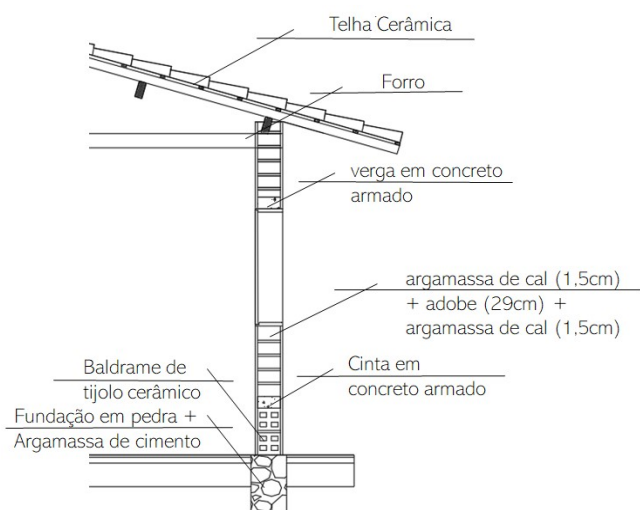


Figura 217 – Corte construtivo modelo 2.

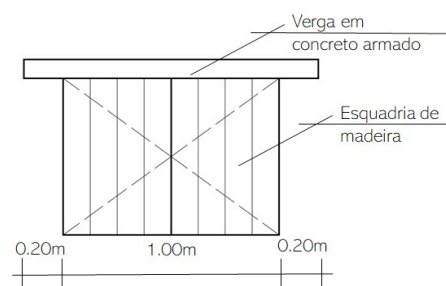


Figura 218 – Detalhe construtivo esquadrias.

De modo a compreender o comportamento do edifício em **orientações** distintas optou-se em rodá-lo a cada 90°, tendo como referência o modelo com azimuth Az0 com a entrada principal voltada para Norte. A cada rotação foi possível obter 4 orientações principais: norte, sul, leste e oeste para cada ambiente e perceber qual o impacto da radiação solar sobre cada uma (Figura 219).

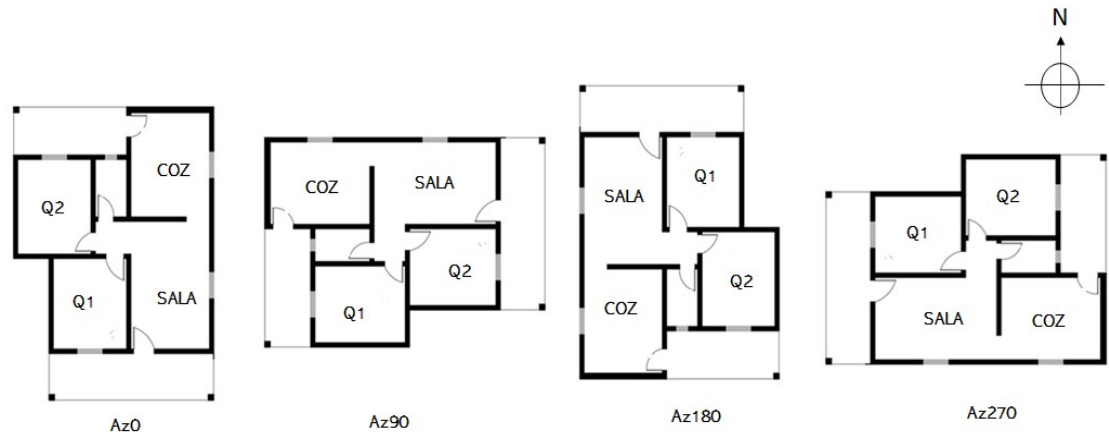


Figura 219 – variáveis orientações

9.2.1. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

O Modelo 2 quando inserido na zona 5 é denominado de modelo 5.2 e apresenta as mesmas propriedades térmicas do modelo 5.1.1, no caso uma cobertura com telha cerâmica pigmentada de marrom escuro e forro PVC, o que representa as seguintes propriedades $\alpha = 0,90$, $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 21,04 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. Enquanto para as paredes adotou-se a parede de adobe com 29,0cm, revestida de cal com espessura de 1,5cm para cada lado, resultando nas seguintes propriedades térmicas $\alpha = 0,90$; $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$; $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Tabela 78).

Tabela 78 – Propriedades térmicas do modelo 5.2.

COBERTURA	
	telha cerâmica (e = 3cm) sem isolamento cor natural + PVC. $\alpha = 0,90$ $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 21,04 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$

PAREDES



Reboco de cal (1,5cm) + adobe (e = 29cm) + reboco de cal (1,5cm).

$$\alpha = 0,90$$

$$U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$$

$$CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$$

O modelo 5.2 ao ser simulado na cidade Guaramiranga apresentou um comportamento similar ao modelo 5.1.1 de 3 quartos, se mantendo sempre acima de 70% de conforto nos meses mais frios de março a julho. Porém, o modelo 5.2 apresenta sempre valores de conforto um pouco inferiores, mas com diferenças poucos relevantes de 2 a 17% (Figura 220).

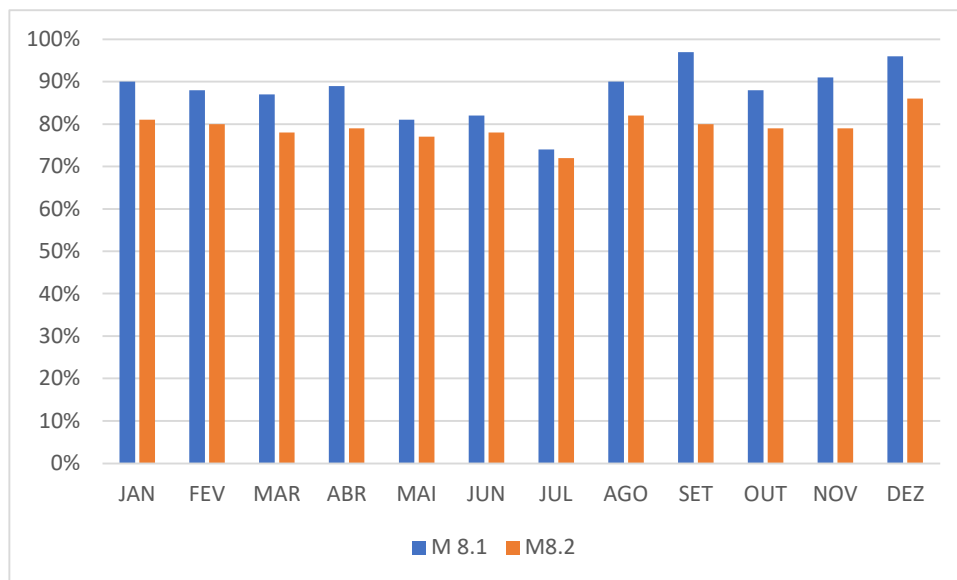


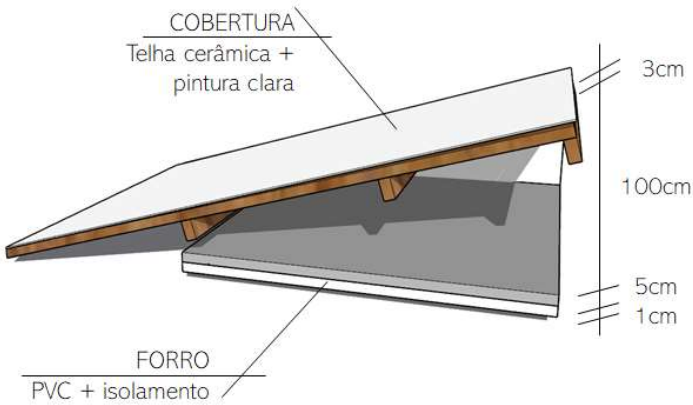
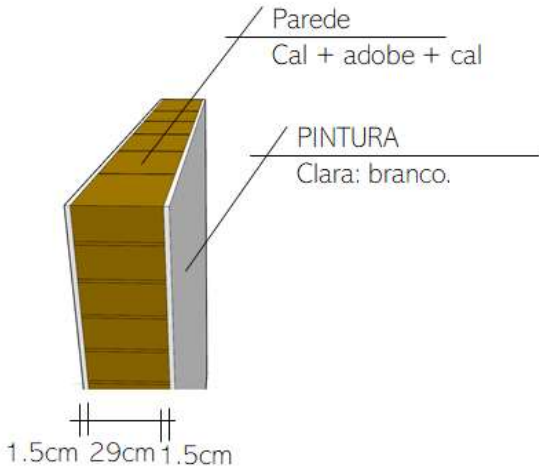
Figura 220 – Análise comparativa modelo 5.1. e 5.2.

Assim como o modelo anterior, conclui-se que para esta zona se faz necessário, a avaliação do uso de esquadrias de vidro e de modo captar uma maior quantidade de calor durante o dia e armazenar durante a noite.

9.2.2. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

Na zona bioclimática 7 o modelo 7.1., composto por uma cobertura de telha cerâmica branca e forro PVC com isolamento com $\alpha = 0,20$; $U = 0,58 \text{ m}^2.\text{K}$; $CT = 27,53 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. Devido ao excesso de calor da zona bioclimática 7, utilizou-se de isolamento na cobertura. Enquanto as paredes de adobe com 29,0cm detêm revestimento de cal com espessura de 1,5cm para cada lado e pintura branca. Uso de cores claras permitiu atingir baixas absortâncias de 0,2 e as paredes espessas permitem moderadas transmitâncias de $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ e elevadas capacidades térmicas $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Tabela 79).

Tabela 79 – Propriedades térmicas do modelo 7.1.

COBERTURA	
	$\alpha = 0,20$ $U = 0,58 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 27,53 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$
PAREDES	
	Reboco de cal (1,5cm) + adobe (e = 29cm) + reboco de cal (1,5cm). $\alpha = 0,20$ $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$

Na zona bioclimática 7, o modelo de 7.2., com área 55,83m², apresentou um comportamento similar ao modelo 7.1, com área 75m², sempre acima de 90% nos meses de março a agosto. Já nos meses de setembro a fevereiro o modelo apresentou valores entre 70% e 90%, sendo os meses de fevereiro e novembro, os meses que atingiram os menores valores (Figura 221).

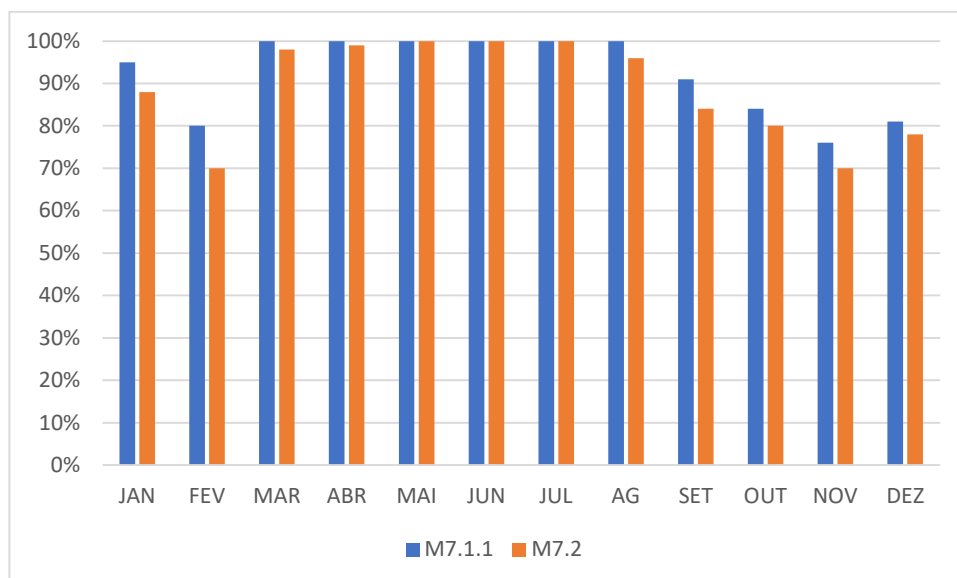


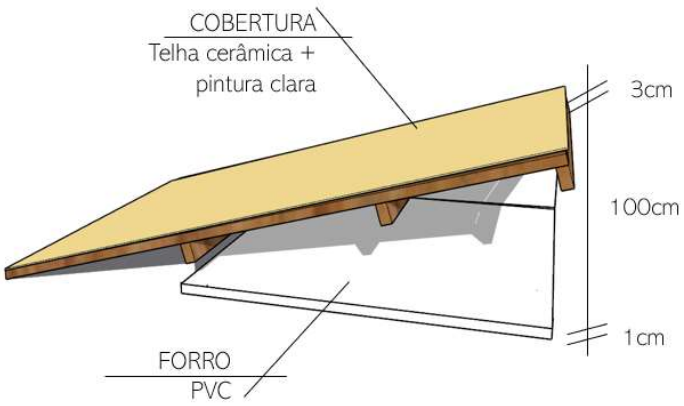
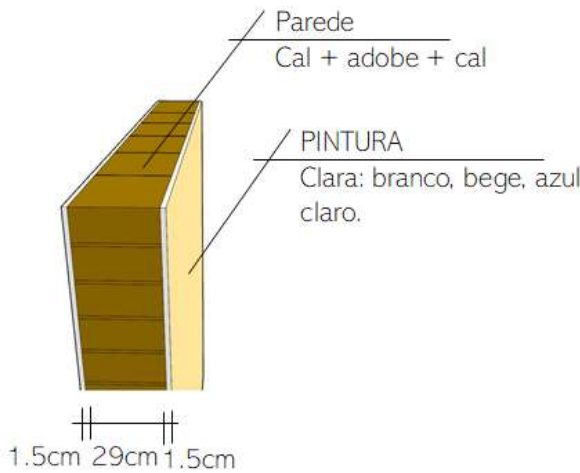
Figura 221 – Análise comparativa modelo 7.1. e 7.2.

Como verificado no gráfico acima, ao decorrer dos meses o modelo de menor área apresenta, também, as menores condições de conforto, mas as diferenças são pequenas de 0 a 10%. Deste modo, considera-se a variável área com irrelevante, e valida-se os parâmetros perante o modelo de 2 cômodos na zona 7.

9.2.3. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

O modelo 8.2. detém as mesmas propriedades térmicas que o modelo 8.1.1. com cobertura em telha cerâmica com clara de modo a atingir absorvância igual a 0,4 e forro PVC, com $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 21,04 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$. As paredes são feitas em adobe com espessura de 29,0cm revestidas com reboco de cal com 1,5cm de cada lado, com pintura clara com $\alpha = 0,40$; $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ e $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$ (Tabela 80).

Tabela 80 – Propriedades térmicas do modelo 8.2.

COBERTURA	
 COBERTURA Telha cerâmica + pintura clara FORRO PVC 3cm 100cm 1cm	telha cerâmica ($e = 3\text{cm}$) cor clara + forro PVC. $\alpha = 0,40$ $U = 1,74 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 21,04 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$
PAREDES	
 Parede Cal + adobe + cal PINTURA Clara: branco, bege, azul claro. 1.5cm 29cm 1.5cm	Reboco de cal (1,5cm) + adobe ($e = 29\text{cm}$) + reboco de cal (1,5cm). $\alpha = 0,40$ $U = 1,75 \text{ m}^2.\text{K}$ $CT = 704 \text{ kJ/m}^2.\text{K}$

O modelo 8.2, na cidade de Fortaleza, apresentou uma taxa de conforto mensal razoável, isto é, acima de 80% em todos os meses. O período que abrange os meses de março a julho é quando ocorre o melhor período de conforto, quando o modelo 8.2 atinge taxas igual ou acima de 90% (Figura 222).

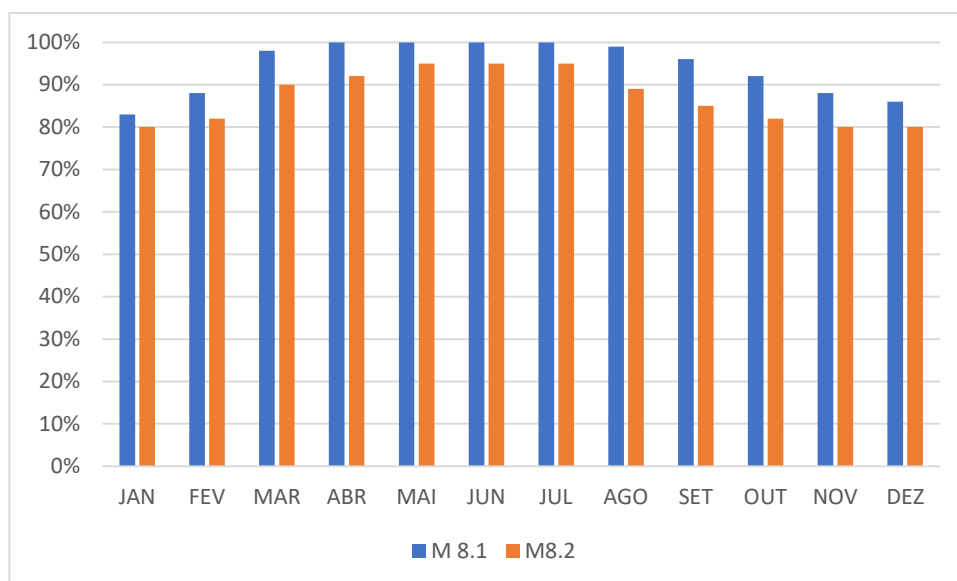


Figura 222 – Análise comparativa modelo 8.1. e 8.2.

O modelo 8.2 apresentou um desempenho térmico similar ao modelo 8.1.1., quando inseridos na zona bioclimática 8. As diferenças de conforto mensais variam entre 5 e 10%, valores muito baixos. Deste modo considerou-se que os parâmetros atendem a modelos de 2 a 3 quartos.

9.2.4. SINTESE

Ao fim do caso de estudo, conclui-se que as alvenarias de adobe e tijolo cerâmico nas atuais tipologias habitacionais PMCMV, inseridas nas 3 zonas bioclimáticas do Ceará, apresentam comportamentos similares, cujo desempenho térmico não é satisfatório. Em geral, os modelos PMCMV não apresentam coberturas de propriedades térmicas adequadas, segundo a NBR 15575 (2013). Deste modo investigou-se as seguintes variáveis: área, orientação e cômodos, que apresentaram baixa influência sobre os modelos, e as variações de paredes de adobe e tipo forro, que apresentaram comportamentos mais relevantes.

No caso das **construções em adobe** percebe-se, que as variáveis: área, orientação e cômodos apresentam uma influência irrelevante na temperatura operativa das habitações econômicas em adobe de um pavimento nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 no Estado do Ceará, apresentando diferenças iguais ou menores que 10% entre as variáveis. Enquanto as variáveis de espessuras de parede e tipos de forro, que alteram as propriedades térmicas da envoltória com transmitância e capacidade térmica, apresentaram uma influência baixa, variando entre 10 e 25%, a depender da zona bioclimática. Por fim, as cores da envoltória apresentaram a maior influência, pois geram variações na absorvância, cuja diferença de conforto entre as coberturas de cores claras e escuras pode chegar a 30% em uma mesma zona bioclimática.

A **variação das áreas** dos modelos habitacionais apresentou baixa influência em quaisquer zonas bioclimáticas do Estado do Ceará. A diferença entre o modelo de 55,83m² e 75m² foi de 5 a 10%, cujo modelo de maior área apresentou sempre as melhores condições de conforto. A **variação da orientação** teve um impacto muito baixo, variando 1 a 12%, a depender da zona bioclimática. Assim como os tipos de cômodos, que em uma mesma orientação e zona bioclimática, apresentaram diferenças de 3 a 9% entre si.

As **espessuras das paredes** demonstram baixas influências, isto é, diferenças entre 10 e 21% entre as paredes mais esbeltas e mais espessas, sendo mais relevantes na zona bioclimática 5, por possuir moderada amplitude térmica e elevado desconforto por frio. As paredes de adobe quanto mais espessas mais contribuíram para o aumento da inércia térmica. Enquanto a variação da absorvência, atingida pelo uso de cores claras ou escuras, tem uma influência maior sobre conforto do edifício que as demais propriedades térmicas apresentadas, como visto na investigação de Chvatal (2014). No caso da zona bioclimática 5, são recomendadas paredes de cores escuras e nas zonas 7 e 8, é sugerido o uso de paredes de cores claras.

A inserção de **forro nas coberturas** apresenta uma elevada melhoria no conforto de qualquer zona bioclimática por reduzir a trocas de calor. Porém, a variação dos tipos forros, sejam leves ou pesados, apresentam baixa relevância entre si, sendo mais relevante na zona bioclimática 5. O uso de forro pesado, apresenta o melhor desempenho por apresentar maior capacidade térmica que os demais, isto é, maior inércia térmica. O uso de isolamento no forro é positivo para as zonas 7 e 8, onde se faz necessário evitar a entrada de calor na edificação, por serem climas muito quentes. Na zona 7, boas taxas de conforto só são atingidas com uso de isolamento térmico. Na zona 8, com uso de coberturas de claras, o isolamento perde seu efeito. Quanto à absorvência, esta é a propriedade térmica que apresenta a maior influência sobre a variação da temperatura operativa interna da edificação. Deste modo, recomenda-se o uso de coberturas escuras na zona 5 de modo a captar maior quantidade de calor. Enquanto nas zonas 7 e 8 recomenda-se o uso de coberturas de cores claras com baixas absorvências.

Em resumo, climas quentes e semiárido ou quente e seco, que não apresentem desconforto por frio como é o caso das zonas bioclimáticas 7 e 8, representadas pelas cidades de Crateús e Fortaleza, respectivamente, os tipos coberturas têm maior relevância do que as paredes, sendo absorvência a propriedade que tem maior influência sobre a temperatura interna das edificações em adobe. A transmitância térmica apresenta uma influência moderada, na cobertura, quando se opta pelo uso do forro ou isolamento térmico, pois contribuem para redução do calor. No caso, as variáveis das paredes apresentam baixo impacto, sendo mais relevantes a variação das cores, do que das espessuras. As espessuras têm baixa contribuição, pois o aumento das espessuras provoca

uma baixa variação da transmitância térmica, propriedade relevante para os climas quentes, pois reduzem a penetração do calor dentro da edificação.

Por sua vez, climas mais frios e úmidos, onde predomina o desconforto por frio, como é caso da cidade de Guaramiranga, representante da zona bioclimática 5, a espessura das paredes de adobe e tipos de forro tem um impacto relevante no conforto térmico da edificação, pois os forros pesados e as paredes espessas, apresentam elevadas capacidade térmicas que tende a contribuição para inércia térmica do edifício. Porém, as coberturas continuam apresentando uma maior influência sobre a temperatura operativa interna do que as paredes.

10. RECOMENDAÇÕES BIOCLIMÁTICAS PARA O PROJETO DE ARQUITETURA DAS HABITAÇÕES DO PMCMV NO CEARÁ

Terminada a recolha de informação, é agora possível reunir todos os dados necessários para apoiar o desenvolvimento do projeto de arquitetura de habitações em adobe para o PMCMV no estado do Ceará, como base nos seguintes critérios:

- As recomendações arquitetônicas aqui apresentadas são baseadas em normas brasileiras e internacionais para a produção de alvenarias em adobe, como a seleção do tipo de solos e a avaliação de sua resistência mecânica. Dentre as normas brasileiras, destacam-se a NBR 16814 – adobe requisitos e métodos, e normas complementares, a ABNT NBR 7181 - Composição granulométrica do solo empregado, de acordo com a norma, a ABNT NBR 7180 - limite de plasticidade – LP e a ABNT NBR 6459 - descrição dos tipos e respectivas proporções de eventuais estabilizantes empregados.
- As recomendações térmicas foram construídas a partir de simulações térmicas desenvolvidas durante a realização da tese para as três zonas bioclimáticas do Estado do Ceará: 5, 7 e 8.
- A recolha da informação também é sustentada em dados coletados na literatura em quesitos gerais de arquitetura, como aspectos formais e construtivos.

As recomendações formais e construtivas aqui apresentadas dão suporte a arquitetos, que desejam projetar e construir com adobe. O método de utilização das recomendações inseridas aqui deve seguir as seguintes etapas do projeto arquitetônico: estudo preliminar, anteprojeto e projeto executivo (Figura 223).

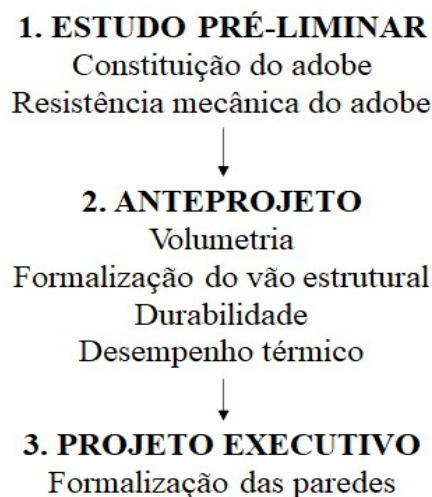


Figura 223 - Diagrama das etapas de projeto.

No Estudo Preliminar são reunidas as condições para a realização do projeto, como a definição do programa, a definição do conceito e o estudo do solo. No Anteprojeto é definida a volumetria do edifício, a formalização dos seus vários componentes e o seu desempenho térmico.

Finalmente no Projeto Executivo, são detalhados e dimensionados todos os sistemas construtivos: fundação, parede e cobertura para dar início a construção (Tabela 81).

Tabela 81 – check list para desenvolvimento de um projeto arquitetônico em adobe.

Recomendações	Estudo preliminar	Anteprojeto	Projeto executivo
Caracterização dos solos	X		
Verificação da resistência mecânica do adobe	X		
Definição da volumetria		X	
Formalização do vão estrutural		X	
Definição de estratégias de durabilidade		X	
Definição de estratégias desempenho térmico		X	
Dimensionamento da fundação			X
Dimensionamento da Parede			X
Dimensionamento da Piso intermediário			X
Dimensionamento da Cobertura			X

10.1. ESTUDO PRÉLIMINAR

No estudo pré-liminar, o projetista, paralelamente ao desenvolvimento do conceito e o programa a seguir, deve estar atento aos parâmetros de constituição e resistência mecânica do adobe de modo verificar a viabilidade de uso da tecnologia.

10.1.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Numa fase inicial deve ser realizada a **caracterização do adobe** em duas ações: seleção de solos, avaliação do desempenho mecânico do adobe. Nas ações iniciais recomenda-se averiguar se na região existem solos adequados à produção de adobe e os adobes produzidos na região apresentam resistência à compressão adequada. A verificação pode ser feita inicialmente em dados de literatura. Mas mesmo com a análise prévia de que os municípios apresentam solos adequados, faz-se necessário realizar a análise dos solos e da resistência mecânica dos blocos.

Neste documento é apresentado o comportamento dos solos e resistência mecânica dos adobes de algumas cidades do estado do Ceará. Na ausência desta informação deve realizar testes de laboratório conforme a NBR 16814 (ABNT, 2020).

Em termos de **composição granulométrica** dos solos, a areia contribui para estruturação do bloco, garantindo sua resistência, enquanto a argila é o elemento ligante das areias. O silte não apresenta nenhuma contribuição específica, mas em excesso pode gerar fissuras no bloco. Quando o solo não apresentar os percentuais adequados podem ser corrigidos com a adição de areia, ou com a mistura de dois ou mais tipos de solos (ABNT 2020). Assim, o percentual para cada grão no solo adequado deve variar da seguinte maneira (ver Tabela 82).

Tabela 82 – Parâmetros de composição granulométrica do solo para adobe.

Composição granulométrica	Parâmetros para Adobe
Areia	45% e 65%;
Tabela Silte	até 30%;
Argila	25% e 35%.

Fonte: (ABNT 2020)

Além da granulometria do solo, são recomendados ensaios de laboratório para avaliar os limites de Atterberg, que permitem avaliar a capacidade de moldagem do solo para produção de adobes. Houben e Guillaud (1994) recomendam que o limite de liquidez (LL) deve estar entre 31-50% e o limite de plasticidade entre 16-33% (HOUBEN and GUILLAUD, 1994) (Tabela 83).

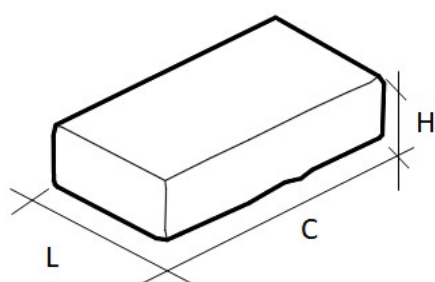
Tabela 83 – Limites de Atterberg para o adobe

Limites de Atterberg	Parâmetros para Adobe
Limite de liquidez (LL)	31-50%
Limite de plasticidade (LP)	16-33%

Fonte: (HOUBEN and GUILLAUD, 1994)

Feita a caracterização pode ser definido o bloco. Ao produzir o bloco, recomenda-se seguir proporções geométricas para garantir o seu melhor desempenho mecânico seguindo as regras seguintes:

- O comprimento (C) seja igual ao dobro da largura (L) acrescida de uma vez a espessura da junta vertical de assentamento (j).
- A altura do bloco (H) deve ser preferencialmente igual à metade da largura e maior ou igual a 7 cm (Figura 224) (ABNT, 2020);



$$H \geq 7 \text{ cm}$$

$$L = 2 H + j$$

$$C = 2 L + j$$

$$j \geq 2 \text{ cm}$$

Figura 224 – Recomendações dimensionais do adobe

A alvenaria de adobe no Brasil era bastante utilizada no período colonial, mas com a implantação da alvenaria de tijolo cerâmica, foi perdendo seu uso. Na atualidade é possível o uso do adobe está presente nas regiões rurais de alguns estados do nordeste brasileiro, como é o caso do Ceará. Este sistema ainda é usado em construções tradicionais e contemporâneas nas cidades de Alcântaras, Aracati, Coreaú, Crateús, Eusébio, Granja, Guaramiranga, Ipueiras, Jijoca, Marco, Moraújo, Mulungu, Uruburetama, Ibiapina, São Benedito, Tianguá e Ubajara, que apresentam solos propícios à construção do adobe (PALITOT 2007); (R. M. de CARVALHO 2012), (AMARAL, INGRID, and COSTA 2019) e (ALCÂNTARA et al. 2018) (Figura 225) e (Tabela 84).

Tabela 84 - tipos de solos para adobe no Ceará.

Amostra	Granulometria			Limites de altemberg			Fonte
	areia	silte	argila	LL	LP	IP	
Ibiapina	45%	55%		21%	17%	4%	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Ibiapina	64%	19%	17%	18%	15%	3%	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Maranguape	42%	58%		34%	21%	13%	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Coreaú	34%	40%	26%	20%	15%	5%	(R. PINHEIRO 2009)
Eusébio	45%	55%		28%	21%	7%	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Jijoca	66%	34%		NL	NP	0%	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)

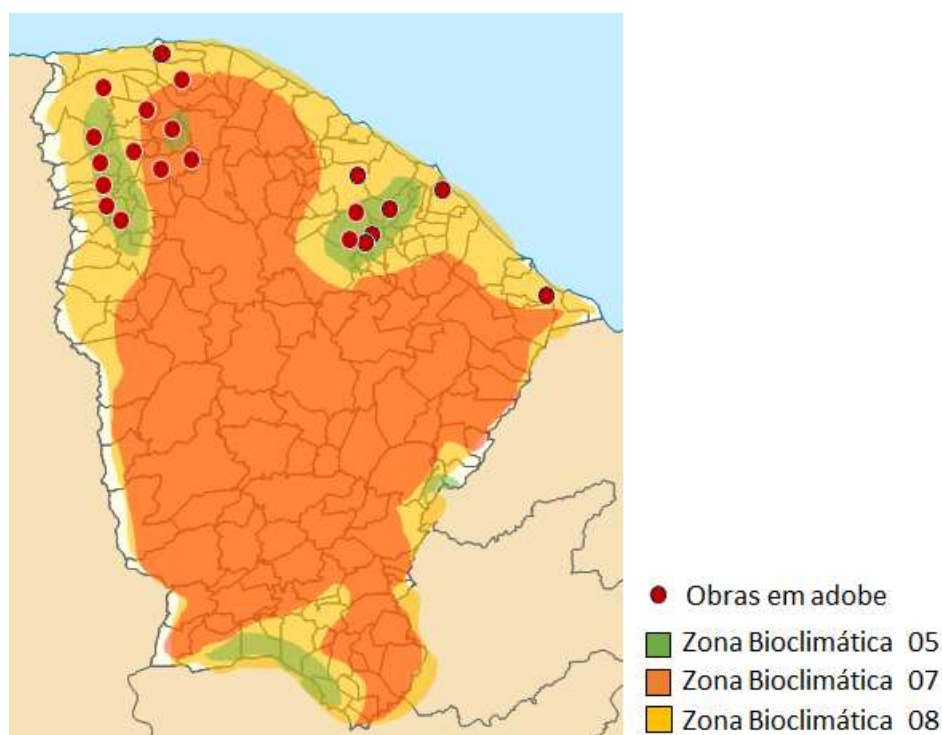


Figura 225 – Obras tradicionais e contemporâneas em adobe no Ceará.

10.1.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA DO ADOBE

O desempenho estrutural de um sistema construtivo é avaliado a partir da análise das deformações que podem ocorrer nas estruturas dos edifícios. As deformações podem ser aceitas, desde que não causem prejuízo ao desempenho de outros sistemas e não comprometam a durabilidade da estrutura (ABNT 2013). Assim, um meio de evitar estas deformações é averiguar os aspectos do sistema e componentes construtivos, a resistência mecânica do bloco e da alvenaria, o tipo de solo e aditivos para correção dos solos (ABNT 2020).

No caso do adobe, para o desempenho estrutural dos blocos recomenda-se uma resistência a compressão de pelo menos 1,5 Mpa. Porém, quando não atingem o valor desejado, é recomendado o uso de aditivos (ABNT 2020). No caso do Ceará, os adobes sem aditivos apresentam resistência mecânica entre 1,02 a 2,5 Mpa. As cidades como Coreaú e Jijoca obtiveram os piores resultados, por estas regiões apresentarem solos arenosos. Os blocos que apresentam desempenhos adequados são possíveis de serem corrigidos utilizando aditivos (R. PINHEIRO 2009) e (AMARAL, INGRID, and COSTA 2019). No Ceará, é comum o uso de aditivos com esterco de cavalo, palha de bambu, fibra de coco e baba de cactos, e segundo Ferreira et Silva (2014), o uso de fibras não deve ultrapassar 15% (S. R. FERREIRA and SILVA 2009). O uso excessivo de fibras pode inclusive prejudicar o desempenho. Num estudo realizado na cidade de Eusébio, verificou-se que o excesso de fibras a 25%, provocou a redução da resistência mecânica de 1,62 Mpa para o adobe sem aditivo para 1,06 Mpa para o adobe com fibras. Em síntese, o desempenho mecânico dos adobes com aditivos e sem aditivos nos municípios cearenses devem ser os apresentados na Tabela 85.

Tabela 85 – síntese do desempenho mecânico de adobes nos municípios do Ceará.

Amostra		Resistência à compressão		Fonte
Município	Obra	Aditivo (%)	Mpa	
Ibiapina	Tradicional	0%	1,63	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Ibiapina	Tradicional	0%	1,43	(ALCÂNTARA et al. 2018)
Maranguape 01	Sítio São Pedro	0%	1,64	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)

Maranguape 01	Sítio São Pedro	25% de esterco	1,36	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Maranguape 02	Estudo acadêmico	0%	1,56	(FERREIRA and SILVA 2009)
Maranguape 02		10% fibra	1,9	
Maranguape 02		20% fibra	1,4	
Coreaú	Tradicional	0%	1,02	(PINHEIRO 2009)
Coreaú	Estudo acadêmico	10% fibra de coco	1,38	
Jijoca	Escola Multiverso	0%	1,32	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Eusébio	Sítio Juazeiro e Sítio Floresta	0%	1,62	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
Eusébio	Sítio Juazeiro e Sítio Floresta	25% de esterco	1,04	(AMARAL, INGRID, and COSTA 2019)
		0%	2,5	
	Estudo acadêmico	5% cinza volante*	3	
Fortaleza		10% cinza volante*	2,7	(COSTA et al. 2014)

* 10% e 20% em relação ao volume do adobe

**5% em relação à densidade do adobe

10.2. ANTE-PROJETO

Na fase de anteprojeto deve-se definir, além da implantação na envolvente e da otimização de posicionamento em relação ao sol, a formalização da volumetria do edifício, prever a solução construtiva e desenvolver estratégias bioclimáticas para otimização do desempenho térmico.

A determinação da volumetria do edifício consiste na definição da sua forma, do número de pavimentos, das dimensões dos vãos estruturais e dos vãos das esquadrias. As paredes que

formalizam este volume, dependendo das necessidades poderão necessitar de diferentes espessuras de paredes, sejam estruturais ou de vedação.

Durante o anteprojeto, deve-se estudar a solução construtiva a seguir, que definirá o desempenho do edifício. Nesta fase será necessário definir o tipo de fundações, paredes e os seus revestimentos, bem como da cobertura. Estes parâmetros, como as espessuras e pigmentação das paredes, serão determinantes para a realização das simulações térmicas para avaliar a eficiência do desempenho térmico.

10.2.1. FORMALIZAÇÃO

A **volumetria** dos edifícios em adobe deve seguir as recomendações seguintes:

- A NBR 16814 que apresenta recomendações para paredes de adobes estruturais para no máximo dois pavimentos (ABNT, 2020).
- As paredes utilizadas exclusivamente para vedação devam ter no mínimo 15cm, enquanto as paredes estruturais de um pavimento 20cm. Quando a edificação tiver dois pavimentos, deve-se utilizar no mínimo a espessura de 30cm (ABNT 2020). No estado do Ceará, as paredes de adobe, quando não rebocadas, simples, apresentam espessuras de 14 a 22cm; quando dobradas as espessuras, variam entre 29 e 45cm (Figura 226).

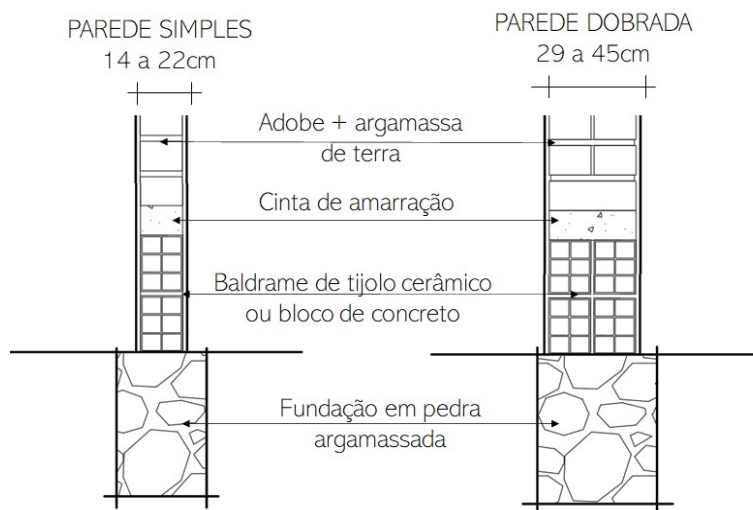


Figura 226 - parede simples paredes dobradas em adobe.

A **formalização do vão estrutural** das alvenarias de adobe, assim como qualquer alvenaria estrutural, são condicionadas a vãos curtos. Assim devem seguir os seguintes critérios:

que podem variar em média de 2 a 4m (A. COSTA et al. 2007). Desse modo, recomenda-se que todas as paredes sejam elevadas até o cumeeiro da cobertura, de modo a receber as cargas do telhado e reduzir a dimensão dos vãos. E que sejam dotadas de uma cinta superior para realizar a amarração das paredes e distribuir melhor a carga da coberta, evitando esforços pontuais (RUANO, COSTA, and VARUM, 2010) (Figura 227).

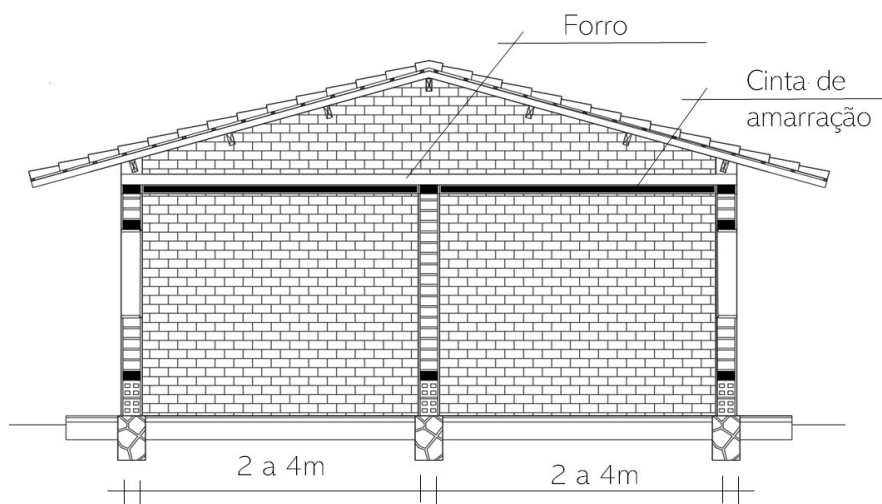


Figura 227 - Parâmetros estruturais para os vãos.

10.2.2. SISTEMA CONSTRUTIVO

Para a concepção do sistema construtivo em alvenaria de adobe, por apresentar uma fácil degradação perante o contato com água líquida, são necessários elementos de proteção para as paredes externas e internas, nas zonas molhadas, como banheiros e cozinhas:

- Deve-se fazer uma proteção na sua base com elevação de pelo menos 30cm acima do solo e impermeabilização de suas fundações, de modo a evitar o contato com a água líquida por capilaridade (VARUM et al, 2005).
- As paredes externas, por sua vez, devem ter um reforço maior com largos beirais de pelo menos 80cm protegendo o seu topo; na ausência de beirais, utilizar-se de calhas ou caleiras (FERNANDES and TAVARES, 2016).
- Em termos de revestimentos, deve-se rebocar as paredes com argamassas à base de cal, pois permitem as trocas de vapor, têm baixa condutividade térmica e funcionam com filtro químico (VEADO, 2008). Outras opções de argamassas de revestimentos são aquelas com baixos valores de absorção de água capilar, elevada capacidade de secagem, elevada permeabilidade ao vapor e baixa permeabilidade à água líquida (MOROPOULOU et al, 2003) e (HERNÁNDEZ et al, 2000).

- A superfície de uma parede de adobe nunca deve ser impermeabilizada, pois o adobe necessita realizar trocas constantes de umidade, podendo haver condensação, quando impermeabilizadas (HOUBEN and GUILAUD, 1989).
- Além do uso destes elementos construtivos nas edificações em adobe, é necessária a manutenção dos mesmos de modo a garantir uma boa vida útil à alvenaria de adobe (VARUM et al, 2005) (Figura 228).

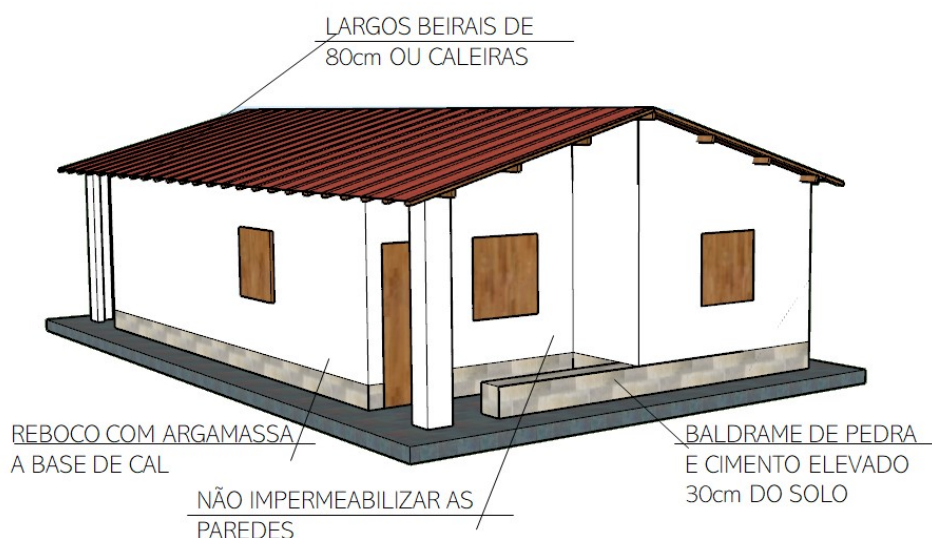


Figura 228 – Recomendações de proteção contra a umidade para as construções em adobe.

10.2.3. ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Os parâmetros para envoltória aqui apresentados consideram que o cômodo pode atingir um bom nível de desempenho térmico, independentemente da sua orientação. Em termos de comportamento térmico, comprovou-se nesta pesquisa que as construções em adobe apresentam um melhor comportamento do que as construções com alvenaria cerâmica nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, tirando as seguintes conclusões:

- Quanto ao comportamento térmico das habitações em adobe nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 constatou-se que a absorvância da envoltória varia de acordo com a pigmentação da superfície e é a propriedade que apresenta a maior influência sobre a temperatura.
- Quanto mais claras as superfícies, menor a absorvância e menor a temperatura interna. Por sua vez, a transmitância e a capacidade térmica apresentam impactos bem menores.

- A transmitância tem o comportamento similar da absorptância, quanto menor seu valor, menor a temperatura.

Em termos de componentes das **coberturas**, percebeu-se que:

- Quando é usado a forro e câmara de ar permitem uma redução considerável da transmitância térmica, assim como o uso de isolamento térmico nos forros.
- Nos experimentos, as camadas de ar apresentaram uma maior espessura que os forros; desse modo constatou-se que o uso, seja de forro leves (PVC, gesso ou madeira) ou pesados (lajes de concreto ou volterrana), não gera grandes diferenças de temperatura.

Relativamente às **paredes de adobe**, verificou-se que:

- Quando se aumentam as espessuras há uma pequena redução da transmitância térmica e um elevado aumento da capacidade térmica.
- A combinação dessas duas propriedades térmicas na alvenaria de adobe faz com que o aumento das espessuras cause um aumento da inércia térmica, principalmente em valores acima de 32cm, estratégia mais viável para zona bioclimática 5, por apresentar temperaturas mais baixas e moderada amplitude térmica. Segundo Rees, Zhou, and Thomas (2013), este fenômeno é explicado por que a capacidade térmica elevada das paredes combinadas com baixas transmitância permitem um bom atraso térmico diurno, cujo calor recebido e acumulado nas paredes é liberado no período noturno.
- Quanto maiores as espessuras, maior o amortecimento térmico diurno e uma maior liberação noturna de calor (REES, ZHOU, and THOMAS 2001).
- Em termos de componentes da envoltória, verifica-se que a cobertura tem maior influência na variação das temperaturas do que as paredes, como constatado por Desogus (2014), em um monitoramento in loco de uma habitação em Sardenha, Itália (Figura 229).

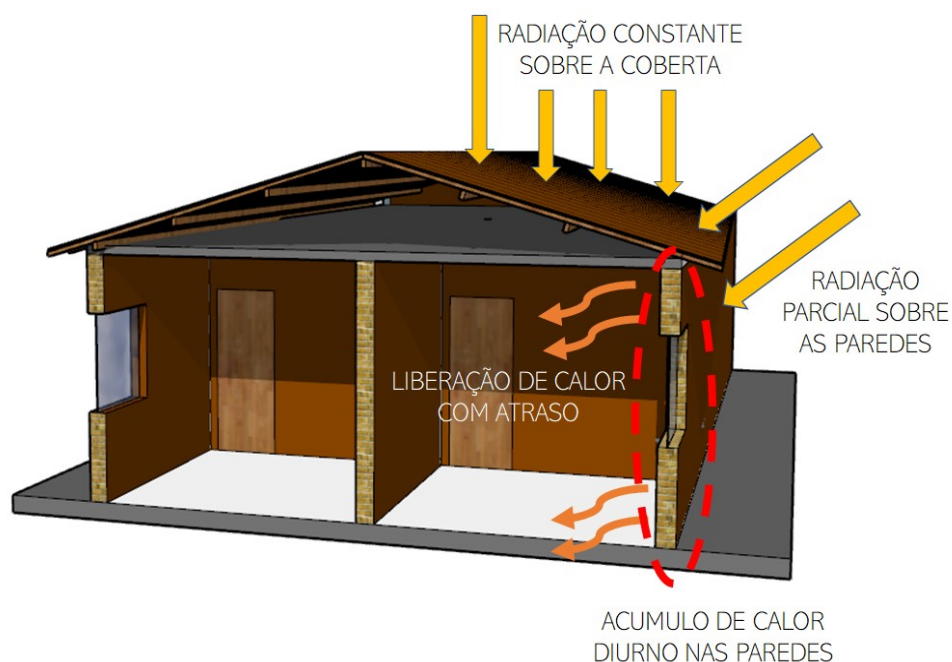


Figura 229– Comportamento térmico das construções em adobe.

a. ZONA BIOCLIMÁTICA 5

A zona bioclimática 5 tem um clima Tropical com inverno seco (Aw) e Subúmido Chuvoso (C1). É encontrado nas poucas regiões do Estado do Ceará com altitudes acima de 600m, como a cidade de Guaramiranga. As temperaturas atingem no máximo 32°C e mínimas de 10°C, no período noturno que se traduz numa média anual de 20,9°C. A precipitação pluviométrica segue um regime de chuvas elevado, se concentrando no primeiro semestre do ano (IMMET, 2018) (Figura 230).

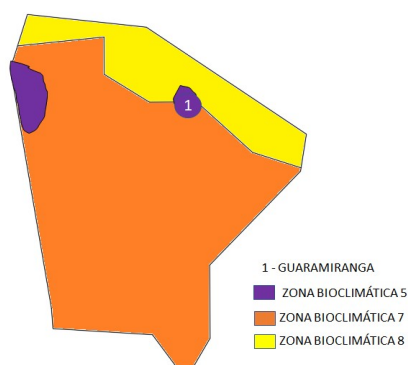
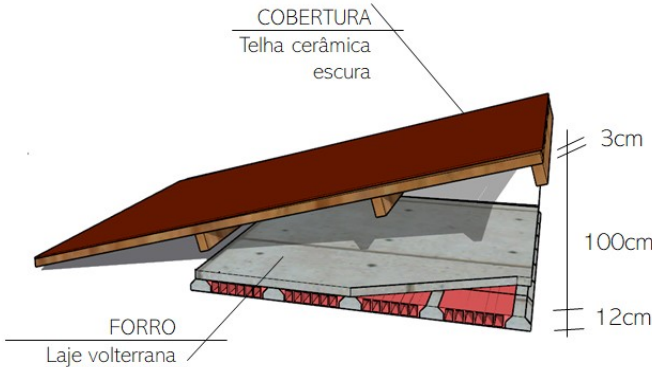
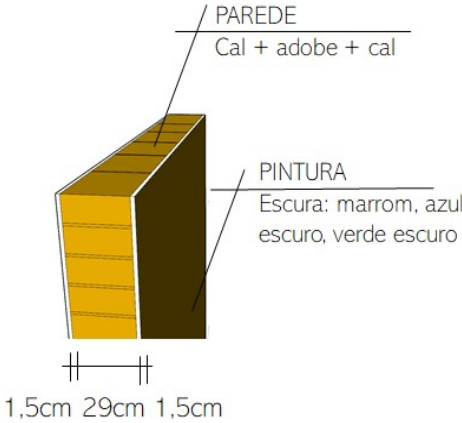


Figura 230 – Zoneamento bioclimática Ceará com destaque para cidades da zona bioclimática 5. Fonte: adaptado de (ABNT 2020).

As estratégias recomendadas para este tipo de clima apontam para o uso de paredes e coberturas pesadas de modo permitir o aquecimento noturno da edificação, combinadas com renovação do ar para retirar o excesso de umidade (ABNT 2005). A partir das recomendações da NBR 15575 e simulações computacionais aplicadas nas habitações em adobe, é sugerido o uso de duas possibilidades de coberturas cerâmicas ou materiais similares com forros pesados ou leves. Quando se adota coberturas com forros leves, com madeira, PVC e gesso, elas devem apresentar telhas cerâmicas com pigmentações escuras. Ao utilizar forros pesados com laje volterrana ou laje de concreto, pode-se utilizar telhas sem pigmentação. No caso das paredes em adobe, as mesmas devem apresentar espessuras de no mínimo 32cm, levando em consideração que, acima deste valor, os ganhos de conforto térmico são irrelevantes (ver Tabela 86).

Tabela 86 – Estratégias bioclimáticas para habitações em adobe para zona bioclimática 5.

COBERTURA	
 COBERTURA Telha cerâmica escura FORRO Laje volterrana	Cobertura leve: material: telha cerâmica (e = 3cm) + forro de sso, PVC ou madeira Cor: azul escuro, verde escuro, preto.
	Cobertura pesada: telha cerâmica + forro laje volterrana ou laje em concreto Cor: sem pigmentação α
PAREDE	
 PAREDE Cal + adobe + cal PINTURA Escura: marrom, azul escuro, verde escuro 1,5cm 29cm 1,5cm	Material: Cal (1,5cm) + adobe (e ≥ 29cm) + Cal (1,5cm) Cor: marrom, azul escuro, verde escuro ou preto.

b. ZONA BIOCLIMÁTICA 7

A zona bioclimática 7 reúne cidades com os climas Seco, Semiárido e Quente (BSH) combinado com árido (E) ou semiárido (D), assim como cidades com o clima Tropical com Inverno Seco (Aw) combinado com o clima semiárido (D). As cidades cearenses que apresentam este comportamento térmico são Barbalha, Campos Sales, Crateús, Iguatu, Morada Nova, Quixadá, Quixeramobim, Jaguaruana, Iguatu e Tauá. Em geral, todas são distantes do litoral, com baixas latitudes com períodos secos de 6 a 9 meses.

Esta zona se distribui entre três estratégias bioclimáticas: DFHIJ, FHIJK e FIJK (Figura 231):

- O tipo DFHIJ, agrupa os municípios de Barbalha, Campos Sales, Crateús e Tauá, com as seguintes recomendações: desumidificação do ar através da renovação de ar, uso de massa térmica para refrigeração e uso de ventilação.
- O FHIJK agrupa os municípios de Modubim, Morada Nova, Quixadá e Quixeramobim, adicionando-se o uso da refrigeração artificial quando necessário, considerando que as estratégias passivas não são viáveis para atingir o conforto térmico em períodos de elevadas temperaturas.
- O tipo FIJK é representado pelo município de Iguatu, cujas recomendações são similares ao tipo FHIJK, com a diferença de que não se recomenda o uso da massa térmica para refrigeração (ABNT, 2005).

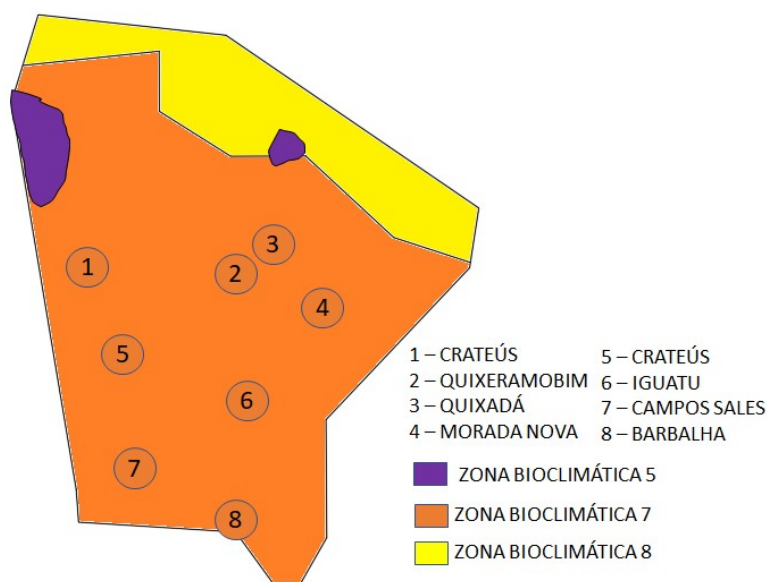
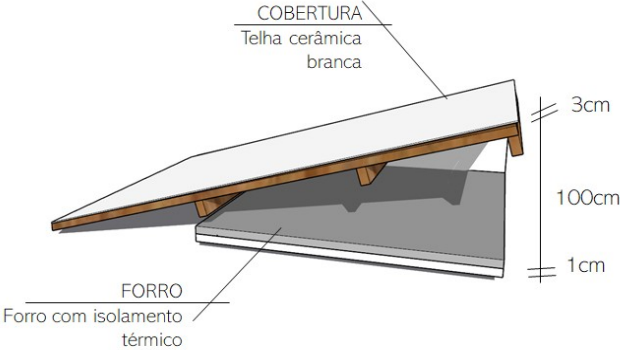
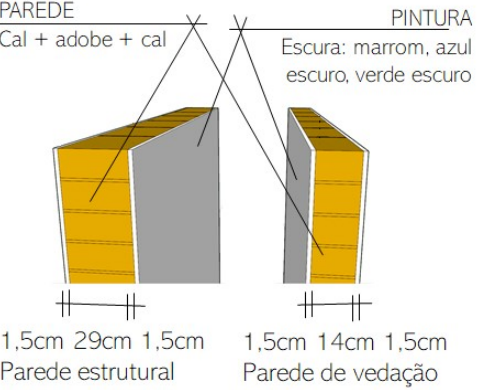


Figura 231 – Zoneamento bioclimática Ceará com destaque para cidades da zona 7. Fonte: adaptado de (ABNT, 2020).

De um modo geral, na zona bioclimática 7, recomendam-se edificações com uso de **paredes** em adobe com cores claras e com espessuras mínimas de 15cm para paredes de vedações e de 25cm para as paredes estruturais. As **coberturas** devem apresentar forro isolado leve ou pesado com pigmentação clara, como o branco. Nessa zona, as **cores** da envoltória têm maior relevância que as demais variáveis dos componentes (Tabela 87).

Tabela 87 – Estratégias bioclimáticas para habitações em adobe para zona bioclimática 7.	
COBERTURA	
 COBERTURA Telha cerâmica branca FORRO Forro com isolamento térmico 3cm 100cm 1cm	Cobertura leve: telha cerâmica (e = 3 cm) + forro isolados, podendo ser leves: gesso, PVC ou madeira ou pesados: laje volterrana ou laje de concreto. Cor: branco
PAREDE	
 PAREDE Cal + adobe + cal PINTURA Escura: marrom, azul escuro, verde escuro 1,5cm 29cm 1,5cm Parede estrutural 1,5cm 14cm 1,5cm Parede de vedação	Paredes de vedação: Cal (1,5cm) + adobe (e ≤ 15cm) + Cal (1,5cm) Paredes estruturais: Cal (1,5cm) + adobe (e ≤ 25cm) + Cal (1,5cm) Cor: branco

c. ZONA BIOCLIMÁTICA 8

A zona bioclimática 8 apresenta o clima Tropical com inverno (Aw) e subúmido seco (C1). No Ceará, é representada pela cidade de Fortaleza. Esses tipos climáticos representam uma moderada parcela do território nas regiões litorâneas (Figura 232).

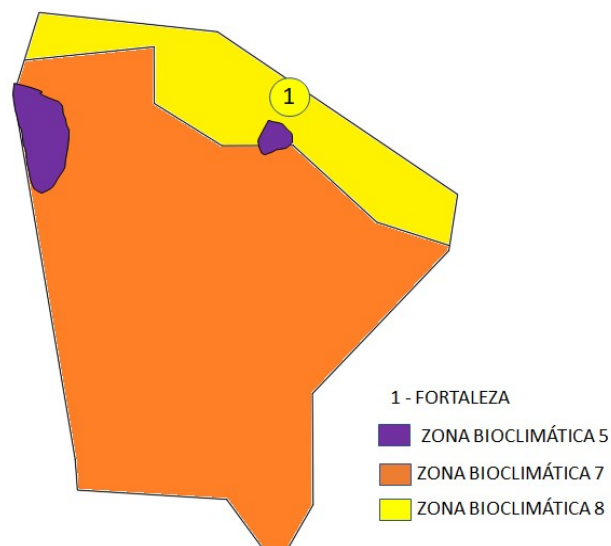
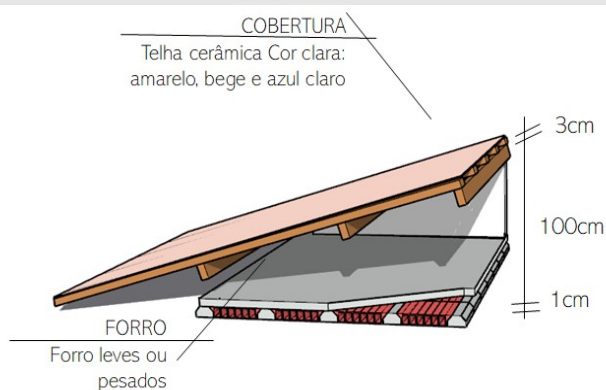


Figura 232 – Zoneamento bioclimática Ceará com destaque para cidades da zona 8. Fonte: adaptado de (ABNT, 2020).

As habitações econômicas construídas em alvenaria de adobe na zona bioclimática 8 devem apresentar **paredes com de cores** claras como amarelo, bege e azul claro, com baixos valores de absorvância com $\alpha \leq 0,40$. Quanto às **espessuras**, não há relevância do ponto de vista térmico, somente estrutural, pelo que se recomenda o uso de espessuras de no mínimo 15cm para paredes de vedação e no caso de paredes estruturais aponta-se para o uso de paredes com no mínimo 25cm. No caso da **cobertura**, é possível a utilização de coberturas de cores claras com pigmentações similares às paredes com forros leves ou pesados (ver Tabela 88).

Tabela 88 – Estratégias bioclimáticas para habitações em adobe para zona bioclimática 8.

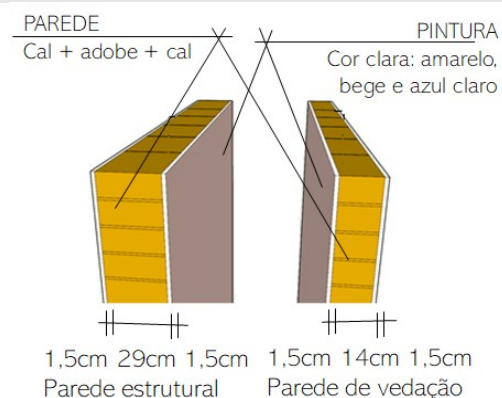
COBERTURA



Cobertura leves: telha cerâmica ($e = 3$ cm) com forro isolados, podendo ser leves: gesso, PVC ou madeira ou pesados: laje volterrana ou laje de concreto.

Cor: amarelo, bege e azul claro

PAREDES



Paredes de vedação: Cal (1,5cm) + adobe ($e \leq 15\text{cm}$) + Cal (1,5cm)

Paredes estruturais: Cal (1,5cm) + adobe ($e \leq 25\text{cm}$) + Cal (1,5cm)

Cor: amarelo, bege e azul claro

10.3. PROJETO EXECUTIVO

Por fim, no projeto executivo, os recomendam soluções construtivas para formalização das paredes, isto é, parâmetros a composição e interface das paredes com outros sistemas construtivos como fundações, esquadrias e coberturas. Estas informações serão o ponto de partida do processo construtivo. Neste sentido serão definidos aqui os parâmetros de arquitetura determinantes para conceber o sistema construtivo pela definição da cobertura, das paredes, das fundações, dos vãos de fachada e do piso térreo.

Na constituição do sistema construtivo da envoltória são organizadas agora as recomendações de como tratar as interfaces entre paredes e outros componentes, como fundações, aberturas, reboco e coberturas, de modo a evitar o surgimento de patologias indesejáveis.

10.3.1. FUNDAÇÃO

Varum et al (2005) recomendam que as **fundações** devem ser compatíveis com a capacidade de suporte do terreno e com as cargas da edificação. Em termos de materiais, deve-se evitar o excesso de areia nas fundações em pedra ou betão ciclópico (VARUM et al, 2005). Entre a base da parede e a fundação, recomenda-se a execução de uma camada de material com altura e propriedades suficientes para proteção contra a ascensão capilar da água (ABNT, 2020). Dentre as possíveis soluções, destaca-se o uso de baldrame de concreto armado ou tijolo cerâmico sobre a fundação com altura de 30cm acima do solo (Figura 233).

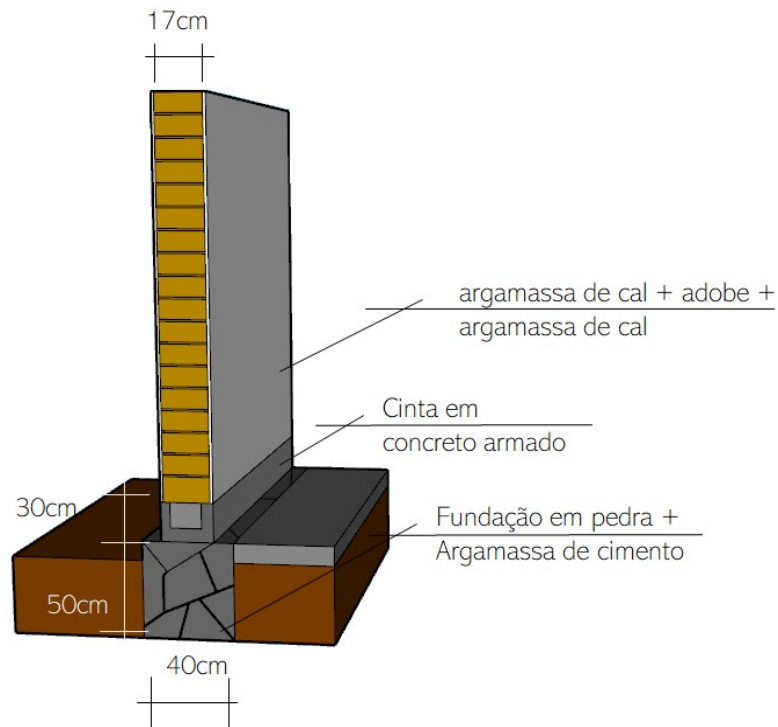


Figura 233 – corte construtivo da fundação de paredes de adobe.

10.3.2. PAREDE

O assentamento do adobe deve ser executado com amarração direta no plano da parede, cuja argamassas de junta vertical ou lateral devem apresentar em média 1,00cm de espessura. Assim como a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, recomenda-se a utilização da amarração de “meio bloco”. A primeira fiada dos blocos se posiciona paralela ao chão e os blocos adjacentes na mesma fiada se encaixam pela espessura. Já os blocos da segunda fiada devem ser encaixados sobre a metade dos blocos da fiada inferior evitando as juntas coincidentes. Esta é a solução que melhor satisfaz a transmissão de esforços entre painéis (VILATÓ et FRANCO, 2000) (Figura 234).

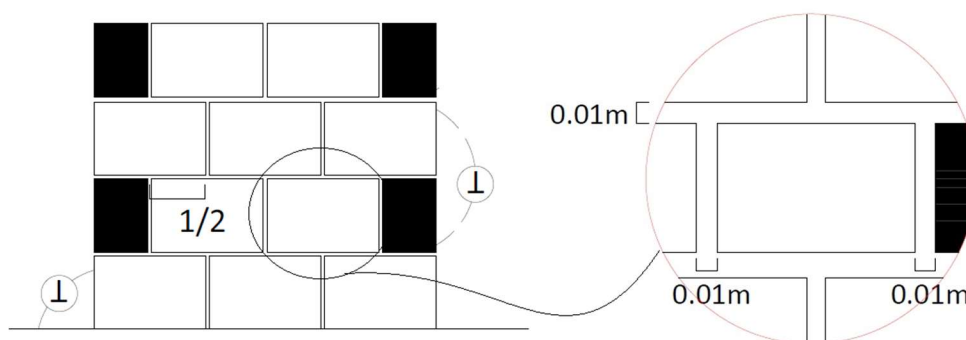


Figura 234 – amarração de meio bloco para paredes de adobe

Quando os adobe forem vazados, devem ser assentados com os furos alinhados (ABNT, 2020) (Figura 235) (ABNT, 2020).

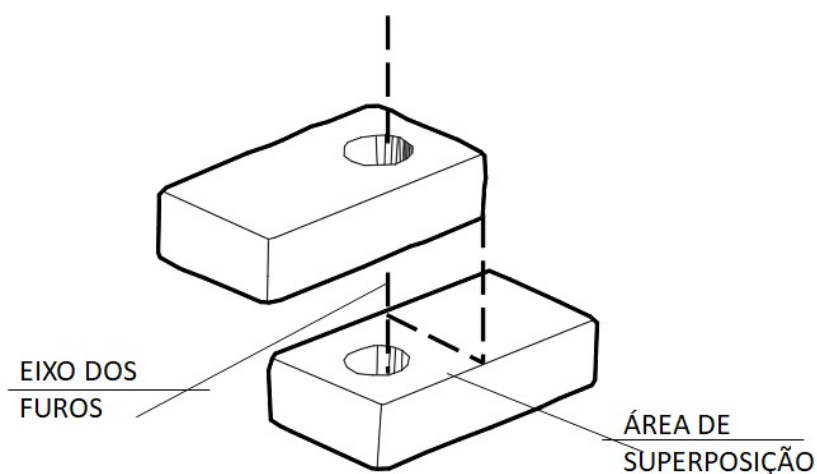


Figura 235 – Assentamento de adobes vazados (ABNT, 2020).

Os vãos nas paredes para esquadrias devem atingir no máximo 1,20m. Sobre os vãos das paredes estruturais de adobe recomenda-se o uso de arcos e vergas de modo a garantir a sobre carga das paredes suspensas. Os arcos podem ser constituídos de adobe ou outros materiais, como pedra e tijolo cerâmico (VARUM et al, 2005). No caso de vergas e contravergas, por serem lineares, aconselha-se que sejam compostos de materiais distintos do adobe, pelo fato da terra crua não suportar grandes esforços de tração, como madeira e concreto armado. As vergas e contravergas devem exceder a largura do vão em pelo menos 20 cm de cada lado e ter altura mínima igual à de um adobe (ABNT, 2020) (Figura 236 e Figura 237).

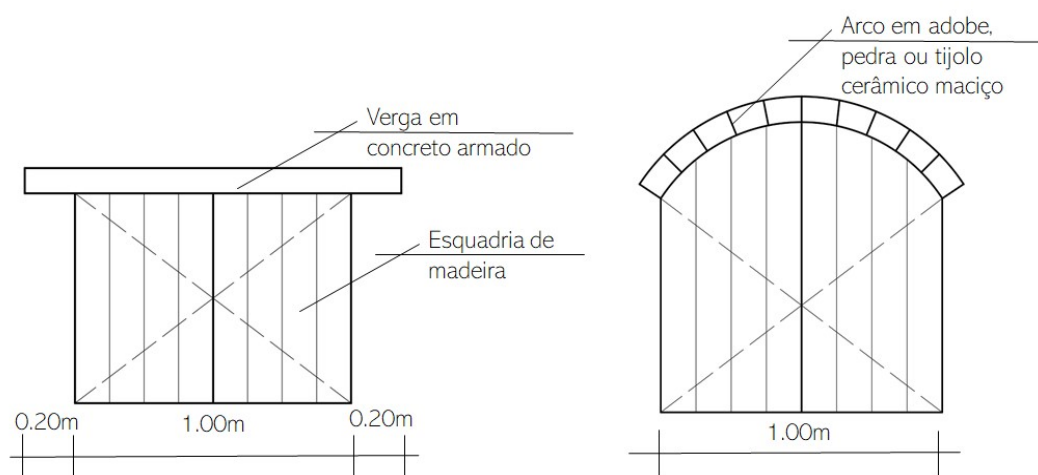


Figura 236 – Parâmetro de verga sobre o vão. Figura 237 –Parâmetro de arcos sobre os vãos.

10.3.3. COBERTURA E PISO INTERMEDIÁRIO

No Ceará as habitações em adobe têm normalmente coberturas em telha cerâmica e estrutura de madeira sem forro. As madeiras podem ser do tipo beneficiada ou madeiras nativas roliças, retiradas da mata local. O uso de madeiras locais pode inclusive reduzir a 20% o custo da habitação (CARVALHO, 2012). O uso do forro é recomendado pela NBR 15522 (ABNT, 2005) de modo atingir um bom conforto térmico para zonas bioclimáticas 5,7 e 8 como foi visto no item anterior “Estratégias bioclimáticas para otimização do desempenho térmico”, seja estes leves ou pesados. Na interface da parede de adobe e a cobertura, NBR 16814 (ABNT, 2020) recomenda uma cinta de amarração em concreto armado com espessura de 10,0cm, localizada sobre o topo da alvenaria de modo a distribuir de uma forma uniforme a carga da cobertura sobre as paredes (ver Figura 238).

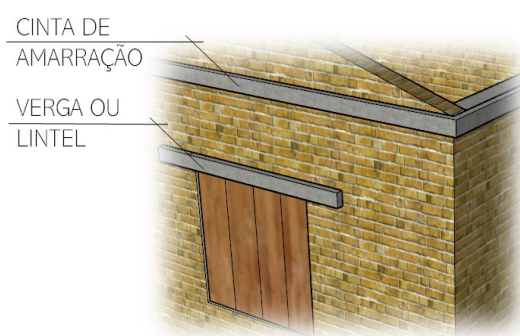


Figura 238 – Cinta de amarração.

Quando se tem cargas concentradas nas paredes, que não estão aplicadas diretamente sobre as cintas, mas em pontos da alvenaria, devem ser colocadas sobre coxins (Figura 239).

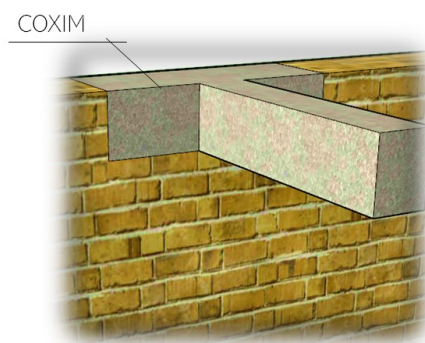


Figura 239 – Coxim sobre a alvenaria de adobe.

Os mesmos devem ser dimensionados para receber e distribuir estas cargas, de acordo com a seguinte fórmula (ABNT 2020):

$$L_c \geq F_d / (t \cdot f_{cad})$$

onde L_c é o comprimento do coxim, que não deve ser inferior ao comprimento de dois adobes; F_d é o valor de cálculo da carga concentrada, calculado por $F_d = 1,4 F$; F é a carga concentrada atuante no coxim; t é a espessura da parede, sem considerar os revestimentos; f_{cad} é a resistência de cálculo do adobe, dada por $f_{cad} = (f_{cak}/2)$; f_{cak} é a resistência característica à compressão do adobe (ABNT, 2020).

11. SÍNTESE DO CASO DE ESTUDO

No PMCV, o requisito básico das envoltórias é que as mesmas sejam normatizadas. A alvenaria de adobe e as cobertas escolhidas, como telhado cerâmico com forro PVC, gesso ou laje volterrana atendem esse requisito e fazem parte da cultura construtiva do Estado do Ceará. O PMCV recomenda para a região Nordeste, onde se situa o estado do Ceará, utilizar coberturas sem forro. Contudo, as simulações realizadas nesta investigação mostram que esta solução não é adequada para os modelos com alvenaria de tijolo cerâmico vazado ou adobe.

Os modelos em adobe e tijolo cerâmico apresentam comportamentos térmicos similares. Porém, em termos de custos, verificou-se, em pesquisas anteriores do pesquisador Carvalho (2012) no estado do Ceará, que a habitação econômica em adobe pode atingir valores que reduzem 40% em comparação à alvenaria em tijolo cerâmico.

O adobe no Ceará, além apresentar um baixo custo, faz parte da tradição construtiva que ainda permanece nas regiões rurais do estado, onde existem solos propícios para as construções em adobe. Os tipos de solos utilizados nas construções em adobe no Ceará, em sua maioria, se enquadram nos limites de Altemberg, granulometria e resistência mecânica, como verificado por diversos autores como Ferreira et Silva (2009), Pinheiro (2009), Carvalho (2012), Costa et al (2014), Alcântara et al (2018) e Lemos et al (2019). Aqueles que não atendem aos requisitos podem ser corrigidos com uso de aditivos com fibras naturais.

Ao realizarmos um cruzamento dos aspectos formais, construtivos e térmicos, determinamos parâmetros para cada zona bioclimática do Ceará. Os requisitos de durabilidade para as alvenarias de adobe são o uso de reboco com materiais com propriedades físicas e químicas semelhantes ao adobe, como cal, terra ou solo cimento. As paredes de vedação devem apresentar no mínimo 15cm, enquanto as estruturais devem atingir a espessura mínima de 20cm, quando tiverem um pavimento, e 30cm, quando tiverem dois.

Quando comparados aos requisitos térmicos, essas espessuras e rebocos de paredes atendem a qualquer especificação das zonas bioclimáticas 5, 7 e 8. No caso da zona 5, constata-se a necessidade de paredes com espessuras de no mínimo 32cm com cores escuras. Para as zonas 7 e 8, a espessura é irrelevante, o importante é que a pigmentação seja clara. A zona 7 necessita de cores que atinjam absorvâncias menores que 0,2; e a zona 8, absorvâncias menores que 8. Outros aspectos como orientação e ventilação não foram avaliados integralmente. O que se verificou foi que em todas as zonas os modelos sem ventilação, isto é, considerando 1 renovação de ar por hora, a orientação dos cômodos não é relevante em relação às variações de temperatura. Assim, as recomendações aqui apresentadas são válidas para qualquer modelo sem ventilação e em qualquer orientação, não havendo, também, restrições quanto às dimensões dos vãos de esquadrias, do ponto de vista térmico.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver diretrizes térmicas e construtivas para o desenvolvimento do projeto de arquitetura de habitações econômicas em adobe para o estado do Ceará. Por compreender que o adobe é uma tradição construtiva rural que permanece neste estado, e por conseguir, segundo Carvalho (2012), a redução de cerca de 40% do custo das habitações econômicas em alvenaria de tijolo cerâmico corrente, esta solução apresenta-se hoje como uma solução adequada para responder ao PMCMV. A normatização do adobe no Brasil em 2019, veio abrir a possibilidade da adoção desta tecnologia na construção de habitações no âmbito do PMCMV (ABNT, 2020). Embora reconhecidas internacionalmente as capacidades de otimização do conforto térmico desta construção, há uma escassez de estudos sobre o desempenho térmico de edificações de adobe para climas tropicais. No Brasil existe apenas um único estudo para uma cidade de clima subtropical (FRANCISCO, 2011). Neste sentido, este trabalho propôs-se reunir as informações necessárias para o desenvolvimento do projeto de arquitetura de habitação do PMCMV em adobe tendo como foco a otimização do desempenho térmico.

Para conseguir dar resposta a este objetivo realizaram-se as seguintes atividades:

- Estudo bibliográfico da arquitetura em terra no Brasil, em particular na habitação popular;
- Levantamento bibliográfico nas normas e na literatura especializada sobre os parâmetros arquitetônicos e construtivos para edificações em adobe no Ceará;
- Análise o desempenho térmico de um modelo habitacional padrão MCMV em adobe e tijolo cerâmico nas zonas bioclimáticas 5, 7 e 8 do estado do Ceará;
- Avaliação o comportamento de uma modelo MCMV em adobe a partir das variáveis de cores da envoltória, espessuras de paredes e tipos de forro, onde se

puderam avaliar propriedades como absorvência, transmitância e capacidade térmica;

- Definição parâmetros de conforto térmico e construtivo para a habitação em adobe para as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, dentro do padrão MCMV;
- Validação dos parâmetros de conforto térmicos para as habitações em adobe para as zonas bioclimáticas 5, 7 e 8, dentro do padrão MCMV;
- Desenvolvimento de diretrizes construtivas e térmicas para o desenvolvimento do projeto de arquitetura de habitações MCMV em adobe, com recomendações de proteção térmicas adequadas às zonas bioclimáticas 5, 7 e 8.

Foram realizadas simulações térmicas na plataforma Energy Plus mesmo considerando algumas limitações da plataforma, como a falta de fidelidade na simulação da ventilação (não foi possível avaliar a variação das renovações de ar, pois são considerados valores constantes o ano inteiro). Desse modo, optou-se por avaliar somente o comportamento dos modelos variando os materiais da envoltória com influência no desempenho térmico como a transmitância, capacidade térmica e absorvência, recomendadas pela NBR 15575. As simulações foram desenvolvidas tendo como base uma tipologia habitacional do PMCMVR. Ao fim deste trabalho constatou-se que:

- Em termos **estruturais**, as espessuras das paredes devem variar entre 17cm para paredes de vedação, 20cm para paredes estruturais de um pavimento, ou 30cm para estruturais de dois pavimentos.
- Como recomendações para **durabilidade**, aponta-se para o uso de revestimentos de cal ou terra, já tradicionais no estado. Para as coberturas, o uso de beirais de 60 a 80cm ou calceiras pode evitar o contato direto da água líquida com a parede.
- A edificação em adobe apresenta um **comportamento térmico** similar às construções em tijolo cerâmico vazado para qualquer zona bioclimática do Ceará, zonas 5, 7 e 8;
- Na zona mais fria, **zona bioclimática 5**, as paredes devem ser mais espessas, com 32cm e com cores escuras, como marrom. Para a cobertura recomenda-se telha cerâmica com forro leve, seja PVC ou gesso, ou pesado, como laje volterrana com a cor natural ou pigmentada de cores escuras;

- Nas **zonas bioclimáticas quentes 7 e 8**, a espessura é pouco relevante, sendo mais importante utilizar cores claras e obedecer às recomendações estruturais para paredes vedação ou estruturais. Em termos de cobertura, é necessário o uso de forros leves ou pesados com telhas de cores claras, como branco para zona 7 e azul claro ou bege para a 8. No caso da zona 7, é a única com a necessidade de um forro isolado;

A partir dos resultados obtidos, desenvolveu-se um manual com recomendações térmicas e construtivas apontando para usos do adobe nas 3 zonas bioclimáticas do Ceará: 5, 7 e 8. Tais recomendações também são válidas para cidades de outros estados brasileiros que se enquadram na mesma zona bioclimática.

2. DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS

Terminada agora esta fase do trabalho, é possível fazer uma reflexão dos caminhos possíveis que esta investigação poderá vir a abrir. Dada a importância que este “instrumento” de apoio ao desenvolvimento do projeto de arquitetura de habitações em adobe para o PMCMV pode vir a ter, seria desde logo útil a expansão desta pesquisa para **outras condições climáticas e tipologias arquitetônicas**, como edificações de dois a quatro pavimentos.

Ao longo do trabalho, foram surgindo algumas lacunas que poderão ser colmatadas em estudos futuros de modo a complementar a pesquisa, como o papel da **ventilação e da radiação solar** sobre as esquadrias. A investigação da **ventilação** é importante, pois, segundo a NBR 15575, para cada zona bioclimática são recomendados formas e horários de ventilação distintos. Nas zonas 5 e 7, recomenda-se ventilação seletiva em turnos distintos. Na zona 8 sugere-se o uso de ventilação constante. Quanto à **radiação solar**, deve-se averiguar o comportamento do edifício quando as esquadrias estiverem abertas no período diurno, momento em que entram radiação solar e vento, considerando a possibilidade de esquadrias sombreadas e sem sombreamento.

Assim, a partir das lacunas e recomendações da NBR 15575 sugerem-se os tópicos seguintes para trabalhos futuros:

- Investigar o impacto da ventilação e sombreamento das aberturas dos modelos desenvolvidos nesta pesquisa, de modo a averiguar novos limites para os parâmetros de absorvância para envoltória ou espessuras de paredes.
- Utilizar plataformas de simulação de ventilação, que apresente boas condições para validar a influência ventilação, e que considere o fluxo de ar em períodos distintos do ano.

Além dessas variáveis, recomenda-se a avaliação de soluções específicas para cada zona bioclimática:

- Para zona 5 pode se avaliar o uso de esquadrias de vidro de modo a captar e armazenar calor
- Na zona 7, o uso de pátios internos para gerar maior umidificação dos ambientes. A utilização destas variáveis pode trazer novos parâmetros para a envoltória, que podem reduzir o custo para edificação para atender o mesmo conforto térmico.

Por fim, a expansão da pesquisa pode gerar novas investigações, como avaliar o comportamento dos modelos em outras zonas bioclimáticas brasileiras, zonas: 1, 2, 3, 4 e 6, considerando a adequação térmica e desenvolvendo novos parâmetros para as edificações em adobe. Do mesmo modo, avaliar os modelos em zonas urbanas e habitações com dois a quatro pavimentos, de modo a averiguar se os parâmetros levantados são válidos para essas condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2005. “NBR 15220: Projeto Completo.” Associação Brasileira de Normas Técnicas, 7.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2013b. “NBR 15575 - Norma de Desempenho,” 63.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2020. “Adobe — Requisitos e Métodos de Ensaio” 007: 4–6.
- ALCÂNTARA, Matheus de Assis, Michael Lima SILVA, Jean Marcell Nunes PARENTE, and Davi Teixeira PINHEIRO. 2018. “Análise de Soluções Construtivas Para Arquitetura Vernácula Em Adobe,” 1–10.
- ALEXANDRIA, Sandra Selma Saraiva, and Wilza Gomes Reis LOPES. 2008. “A Terra Na Construção Civil: Edificações de Adobe No Município de Pedro II, Piauí.” XII Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído, no. 1: 10.
- AMARAL, Alan Lemos, Livia INGRID, and De Oliveira COSTA. 2019. “Estudo Do Emprego Do Adobe Em Obras Sustentáveis No Estado Do Ceará,” no. REGEO.
- ANTONELLO, Sanna, Carlo ATZENI, and Stefano F MUSSO. 2006. “Architettura in Terra Cruda” i.
- AZERÊDO, A. F. N.; Santos, L. M. A. S.;, S. R. H.; AZERÊDO, G. A.; Assis, and N. P. BARBOSA. 2015. “Caracterização Da Argila Usa-Da Nas Olarias Próximas Ao Município de Princesa Isabel-PB Para Produção de Tijolos de Adobe.” In . João Pessoa, Paraíba, Brasil: 1º Encontro Internacional de Educação Profissional.
- BARRETO, Demis Ian Sbroglia, Günter WEIMER, Humberto Medeiros, and Werther HOLZER. 2010. “A Arquitetura Popular Do Brasil.” Rio de Janeiro: Bom Texto.
- BENINCASA, Vladimir, Maria Ângela Pereira DE CASTRO, and Silva BORTOLUCCI. 2009. “Fazenda Angélica e o Barão de Grão-Mogol.” Labor e Engenho 3 (1): 82–109.
- BIERRENBACH, Ana Carolina de Souza. 2008. “Conexão Borsói-Bardi: Sobre Os Limites Das Casas Populares.” Risco: Revista de Pesquisa Em Arquitetura e Urbanismo (Online), no. 7: 49–61.
- BORGES, Ariane Magda. Vernaculares: a casa de fazenda seridoense do século XIX como exemplo de adaptação ao clima semiárido. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- BRASIL, Amíria Bezerra, Carla Camila Girão ALBUQUERQUE, and Rérisson MÁXIMO. 2013. “Tipificação de Municípios Como Estratégia de Territorialização Do Planejamento Habitacional: Parâmetros de Classificação e Priorização Adotados No Plano Estadual de Habitação de Interesse Social Do Ceará.” Anpur, 1–21.
- BRITO, Pedro. 2003. “" Moradas ", as Primeiras Residências Urbanas : Arquitetura Tradicional Piauiense Na Cidade de Pedro II.”
- BRUNO, Patricia, and Paulina FARIA. 2010. “Cabanas de Materiais Vegetais Na Herdade Da Comporta. Tradição Construtiva e Novas Abordagens.” Terra Em Seminário 2010, 240–296

- CARDOSO, Daniel Ribeiro. 2011. "Desenho de Uma Poiesis." Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora.
- CARIGNANI, Gisele, and Victor Bruno Gonçalves DOS REIS. 2014. "Projeto de Extensão-Resgate Cultural: O Adobe Como Técnica Vernacular Em Barra Do Bugres-MT-Um Relato de Experiência."
- CARVALHO, Aline Werneck Barbosa de, Nayara Elisa Silva de PAULA, and Dafhini Aline Grego PEREIRA. 2017. "Programa Nacional de Habitação Rural e Modo de Morar No Campo: Reflexões a Partir Da Casa Rural Na Zona Da Mata Mineira." Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo, no. 17. <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n17.2016.03>.
- CARVALHO, Ricardo Marinho de. 2012. "Soluções Para a Construção de Habitação Em Adobe a Custos Controlados."
- CHVATAL, Karin Maria Soares. 2014. "Avaliação Do Procedimento Simplificado Da NBR 15575 Para Determinação Do Nível de Desempenho Térmico de Habitações." Ambiente Construído 14 (4): 119–34. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212014000400009>.
- COLIN, Sílvio. 2010. "Técnicas Construtivas Do Período Colonial," 1–11. <http://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2010/09/06/tecnicas-construtivas-do-periodo-colonial-ii/>.
- COMERLATO, Fabiana. 1998. "Análise Espacial Das Armações Catarinenses e Suas Estruturas Remanescentes: Um Estudo Através Da Arqueologia Histórica." Porto Alegre.
- COSTA, Aníbal, Humberto VARUM, Henrique PEREIRA, Hugo RODRIGUES, Romeu VICENTE, António ARÊDE, and Alexandre Costa. 2007. "Avaliação Experimental Do Comportamento Fora Do Plano De Paredes De Alvenaria De Adobe." Seminário Arquitectura de Terra Em Portugal 1.
- COSTA, Heloína Nogueira Da, Levi Teixeira PINHEIRO, Francisco Charlys Moreira De MENEZES, and Antonio Eduardo Bezerra CABRAL. 2014. "Avaliação de Tijolos de Adobe Com Adição de Cinzas e Fibras Do Coco." XV Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído 1 (November): 3033–42. <https://doi.org/10.17012/entac2014.55>.
- DACANAL, Cristiane, Simone do N. LUZ, Silvia H.N. TURCO, and Osvaldo C.de M. VASCONCELOS. 2018. "Diagnosis and Recommendations for the Bioclimatic Design of Grape Packing Houses in Hot and Dry Climate." Engenharia Agrícola 38 (1): 1–6. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p1-6/2018>.
- DE GRAAF, E. e COWDROY, R., (2000) Theory and Practice of Educational Innovation Introduction Problem-Based Learning in <HTTP/www.ijee.dit.ie/articles/999986/article/html>., pp.1-11.
- DELGADO, Jiménez, M. CARMEN, and Ignacio Cañas GUERRERO. 2007. "The Selection of Soils for Unstabilised Earth Building: A Normative Review." Construction and Building Materials 21 (2): 237–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>.
- DELGADO, M Carmen Jiménez, and Ignacio Cañas GUERRERO. 2006. "Earth Building in Spain." Construction and Building Materials 20 (9): 679–90.
- DESOGUS, G, S DI BENEDETTO, W GRASSI, and D. TESTI. 2014. "Environmental Monitoring of a Sardinian Earthen Dwelling during the Summer Season." Journal of Physics: Conference Series 547 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/547/1/012009>.

- DOFLER, Mariana, and Eduardo KRUGER. 2016. “Simulações de Desempenho Térmico de Moradias Do PMCMV Em Diferentes Zonas Bioclimáticas Quanto Aos Aspectos de Implantação, Materialidade e Sombreamento Das Aberturas.” In , 13. São Paulo: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção. São Paulo, 2016. <https://docplayer.com.br/57081840-Xvi-encontro-nacional-de-tecnologia-do-ambiente-construido.html>.
- ELERT, Kerstin; PARDO, Eduardo Sebastián; RODRIGUEZ-NAVARRO, Carlos. Alkaline activation as an alternative method for the consolidation of earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, v. 16, n. 4, p. 461-469, 2015.
- Eletrobras/Procel, and Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações CB3E. 2012. *MANUAL Para Aplicação Da RTQ-R*.
- FERNADES, Maria, and Alice TAVARES. 2016. *O Adobe*. Edited by Argumentum. 1st ed. Porto.
- FERREIRA, Camila, Henor Artur de SOUZA, and Eleonora Sad de ASSIS. 2014. “Estudo Do Clima Brasileiro: Reflexões e Recomendações Sobre a Adequação Climática de Habitações.” *ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO* 15.
- FERREIRA, Saulo R., and Adeildo C SILVA. 2009. “Estudo Das Propriedades Mecânicas de Adobe Com Adição de Fibras Vegetais Do Coco Verde.” In *Encontro Nacional Sobre Provedimento de Resíduos Na Construção—ENARC*. Feira de Santana.
- FIGUEIREDO, Margareth Gomes, Humberto VARUM, and Aníbal COSTA. 2011. “Caracterização Das Técnicas Construtivas Em Terra Edificadas No Século XVIII e XIX No Centro Histórico de São Luís (MA, Brasil).” *Arquiteturarevista* 7 (1): 81–93. <https://doi.org/10.4013/arq.2011.71.08>.
- FJP, Fundação João Pinheiro. 2018. “Déficit Habitacional No Brasil.” Belo Horizonte. <http://fjp.mg.gov.br/index.php/produtos-e-servicos/2742-deficit-habitacional-no-brasil-3>.
- FLORENSA, Rafael Serra. 1989. *Clima, Lugar y Arquitectura*: [Manual de Diseño Bioclimático].
- FRANCISCO, Máira do Lag. 2009. “Recomendações de Conforto Térmico Para Projeto Arquitetônico e Implantação de Unidades Habitacionais Em Assentamentos Rurais.” <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-12012010-092153/pt-br.php>.
- FRANCISCO, Máira do Lago. 2011. “Recomendações de Conforto Térmico Para Projeto Arquitetônico e Implantação de Unidades Habitacionais Em Assentamentos Rurais: Caso Assentamento Rural Sepé Tiaraju, Serra Azul-SP.” Universidade de São Paulo.
- FROTA, Anésia Barros, and Sueli Ramos SCHIFFER. 1995. *Manual de Conforto Térmico*. Studio Nobel.
- GIVONI, Baruch. 1992. “Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines.” *Energy and Buildings* 18 (1): 11–23.
- GOMES, Maria Idália, FARIA, Paulina, GONÇALVES, Teresa Diaz. 2017. “Earth-Based Mortars for Repair and Protection of Rammed Earth Walls. Stabilization with Mineral.”
- GUIMARÃES, Edilene Pereira. 2013. “Os Reflexos Da Urbanização Do Campo Nos Modos de Moradia Das Famílias Residentes Na Zona Rural Do Municípios de Araponga - MG.” *Revista Brasileira de Economia Doméstica*, 21.

- HABIB, RICARDO CEZAR MELLO MATTOS. 2014. “TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO DE ISOLANTES TÉRMICOS NA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES: ESTUDO DE CASO DA LÃ DE ROCHA NA ZONA BIOCLIMÁTICA 1 DO BRASIL.” *Implementation Science*. Universidade Federal do Paraná. <https://doi.org/10.4324/9781315853178>.
- HAMDAN, M.A. 2002. “Layered Wall Design to Prevent Moisture Condensation on Its inside Surface.” *Energy Conversion and Management* 43 (14): 1821–28. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00140-6).
- HASSANAIN, A A, E M HOKAM, and T K MALLICK. 2011. “Effect of Solar Storage Wall on the Passive Solar Heating Constructions.” *Energy and Buildings* 43 (2): 737–47.
- HEATHCOTE, K. 2011. “El Comportamiento Térmico de Los Edificios de Tierra.” *Informes de La Construcción* 63 (523): 117–26. <https://doi.org/10.3989/ic.10.024>.
- HEATHCOTE, Kevan. 2011. “The Thermal Performance of Earth Buildings.” *Informes de La Construcción* 63 (523): 117–26.
- HELENA, Simone, and Tanoue VIOZIOLI. 2003. “Projeto De Pesquisa ‘Promoção do Desenvolvimento Sustentável Nas Comunidades Do Semi-Árido Da Bahia ’.” 1–10.
- HERNÁNDEZ, Sánchez R., M. BARRIOS, Suárez, and J. M. POZAS, Martín. 2000. “Caracterización de Materiales Antiguos de Construcción (Tapial y Adobe) En Las Iglesias de Cisneros, Villada y Boada de Campos (Palencia).” *Materiales de Construcción* 2000 (257): 33–45. <https://doi.org/10.3989/mc.2000.v50.i257.416>.
- HOUBEN, Hugo, and Hubert GUILAUD. 1989. *Traité de Construction En Terre*. Editions Parenthèses.
- HOUBEN, Hugo, and Hubert GUILLAUD. 1994. *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. Intermediate Technology Publications.
- INO, Akemi, Almeida LOPES, Anaïs Guéguen PERRIN, Angel Stive Castañeda RODRIGUEZ, Cecília Corrêa LENZI, Fernanda SELEGUIM, Mathilde do Prado Teixeira COL, Rodolfo José Viana SERTORI, and Thiago Lopes FERREIRA. 2019. “Seminário Regional Do Habitat Rural: Moradia, Produção e a Questão Agrária No Oeste Paulista.”
- ISIK, Bilge, and Tugsad TULBENTCI. 2008. “Sustainable Housing in Island Conditions Using Alker-Gypsum-Stabilized Earth: A Case Study from Northern Cyprus.” *Building and Environment* 43 (9): 1426–32.
- KANAN, Maria Isabel. n.d. “The Mediterranean Portuguese Influence in the Brazilian Earth-Building Tradition: A Valuable Heritage to Research,” 1–10.
- LAMBERTS, R, and L DUTRA. 2014. “PEREIRA, FOR Eficiência Energética Na Arquitetura. 3ª Edição.” Eletrobras Procel.
- LAMBERTS, Roberto. 2016. “Desempenho Térmico Em Edificações.” *Universidade Federal de Santa Catarina* 7º: 239.
- LEMONS, Carlos A C. 1985. “Alvenaria Burguesa.” São Paulo: Nobel 2.
- LENGEN, Johan Van. 1996. *Manual Do Arquiteto Descalço*. Instituto de Tecnologia Intuitiva e Bio-Arquitetura.
- LIMA, Mariana Brito de, and Edson Leite RIBEIRO. 2009. “Diretrizes Urbanísticas e Construtivas Para Cidades de Clima Semi-Árido.” *PARC Pesquisa Em Arquitetura e*

- Construção 1 (4): 20. <https://doi.org/10.20396/parc.v1i4.8634499>.
- LIUZZI, S. et al. 2013. 'Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate', *Building and Environment*, 61, pp. 82–92. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.12.006.
- LOPES, Wilza Gomes Reis. 1998. "A Taipa de Mão No Brasil: Levantamento e Análise de Construções. São Carlos 1998. 232p." Dissertação (Mestrado em Arquitetura, área de concentração: Tecnologia do Ambiente construído) -Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MACÊDO, Deborah, Celme TORRES, Carlos Wagner OLIVEIRA, Francismar De Menezes ALVES, Thiago Bessa PONTES, and Introdução Desenvolvimento. 2012. "CASAS DE TAIPA NA ZONA RURAL JUAZEIRO DO NORTE: DE AMEAÇA A SAÚDE A SOLUÇÃO PARA SUSTENTABILIDADE." In IV Encontro Universitário Da UFC No Cariri, 1–5.
- MAIA, Rafael Torres. 2011. "Avaliação Das Variáveis Que Influenciaram No Uso Da Terra Como Material Construtivo Para Habitação Social Rural No Assentamento Rural Sepé Tiaraju-Serra Azul-SP." Universidade de São Paulo.
- MATOS, Luís, and Carlos Pina DOS SANTOS. 2006. "Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos Da Envolvente Dos Edifícios (ITE 50)." Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- MAZRIA, Edward. 1979. "Passive Solar Energy Book."
- MEDEIROS, Deisyane, and Gleice ELALI. 2011. "Construindo No Clima Quente E Seco Do Brasil: Conforto Térmico E Eficiência Energética Para a Zona Bioclimática 7," no. 1: 1–15.
- MELLO, Sandra Soares, Bey Ayres SILVA, Ricardo Britto ROCHA, José Zanine CALDAS, C. P. Cardoso CARDOSO, Eliana DORIA, and Luís GALVÃO. 1985. *Taipa Em Painéis Modulados*. Edited by Centro de desenvolvimento e apoio técnico à educação. Brasília.
- MILANEZ, Álvaro. 1958. *Casa de Terra: As Técnicas de Estabilização Do Solo a Serviço Do Homem Do Campo*. Serviço Especial de Saúde Pública/ Ministério Da Saúde. Rio de Janeiro.
- MINKE, Gernot. 2005. "Manual de Construcción En Tierra." Editorial Fin de Siglo. Uruguai.
- MINKE, Gernot. 2012. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Walter de Gruyter.
- MOREIRA, M. M. K., and M. A. P. REZENDE. 2018. "Arquitetura Vernácula Na Lapinha Da Serra, Brasil: Motivos O Uso Do Adobe No Brasil: Uma Revisão Da Literatura de Arquitetura e Construção Com Terra No Brasil." In *Terra Brasil. V II Congresso de Arquitetura e Construção Com Terra No Brasil*. Rio de Janeiro.
- MOREL, J C, J E AUBERT, Y MILOGO, E HAMARD, and A FABBRI. 2013. "Some Observations about the Paper 'Earth Construction: Lessons from the Past for Future Eco-Efficient Construction' by F. Pacheco-Torgal and S. Jalali." *Constr Build Mater* 44: 419–21.
- MOROPOULOU, Antonia, Kyriaki POLIKRETI, Veronica RUF, and George DEODATIS. 2003. "San Francisco Monastery, Quito, Equador: Characterisation of Building Materials, Damage Assessment and Conservation Considerations." *Journal of Cultural Heritage* 4 (2):

- MUNIZ, Lucas Falcão, José MARCELO, Rodrigues PEREIRA, Celso LIRA, and Ximenes JÚNIOR. 2017. “Classificação Climática Para O Estado Do Ceará Climate Classification for the State of Ceará Using Various Characterization Systems,” 1–8.
- NETO, Edmar Braga. 2013. “FAZENDAS E CASAS DE TAIPA: A DINÂMICA DO SISTEMA DE MORADORES NO SEMIÁRIDO.” Universidade Federal do Ceará. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- NEVES, Célia, and Obede Borges FARIA. 2011. *Técnicas de Construção Com Terra*. Bauru-SP, Brasil: FEB-UNESP / PROTERRA.
- Neves, Célia Maria Martins. 1995. “Inovações Tecnológicas Em Construção Com Terra Na Ibero-América.” NUTAU Arquitetura de Terra: LGP-. AUUSP, 49–60.
- NEVES, Célia Maria Martins. 2004. “Resgate e Atualização Do Construir Com Terra: O Projeto PROTERRA.” In I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável & X Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído. Anais. São Paulo, 18–21.
- NOBREGA, Ranyére Silva. 2010. “Revista Brasileira de Geografia Física.” *Revista Brasileira de Geografia Física* 03: 18–22.
- OLARTECHEA, Mauro, Ivan J A CALLEJAS, Luciane Cleonice DURANTE, Andrade C ROSSETI, Marcos JUNIOR, and Soares DE LIMA. 2015. “Bioclimáticas No Desempenho Termoenergético De Habitação De Interesse Social (Zb 07),” no. Zb 07: 1–9.
- PACHECO, Miguel Teixeira Gomes. 2013. “Ventilação Natural E Climatização Artificial: Crítica Ao Modelo Superisolado Para Residência De Energia Zero Em Belem E Curitiba,” 292.
- PALITOT, Estêvão Martins. 2007. “Conflitos Socioambientais e Disputas Territoriais: A RPPN Serra Das Almas e Os Tabajara de Crateús / CE .”
- PARRA-SALDIVAR, M. Luisa, and William BATTY. 2006. “Thermal Behaviour of Adobe Constructions.” *Building and Environment* 41 (12): 1892–1904. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.021>.
- PAULA, Paulo Roberto Freire DE. 2017. “AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE CASAS DE GESSO NO BRASIL.”
- PEEL, Murray C, Brian L FINLAYSON, and Thomas A MCMAHON. 2007. “Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification.” *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4 (2): 439–73.
- PERRIGAULT, Thibault, Vergil WEATHERFORD, Jaime MARTÍ-HERRERO, and Davide POGGIO. 2012. “Towards Thermal Design Optimization of Tubular Digesters in Cold Climates: A Heat Transfer Model.” *Bioresource Technology* 124 (August): 259–68. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.019>.
- PINHEIRO, Levi T, Bárbara R CARVALHO, Ana S GUIMARÃES, and Adeildo Cabral SILVA. 2016. “ANALYSIS OF SCIENTIFIC PRODUCTION RELATED TO EARTH CONSTRUCTIONS IN THE LAST 20 YEARS (1996-2015),” no. September: 1–9.
- PINHEIRO, Levi Teixeira, Bárbara Rangel CARVALHO, and Adelido Cabral SILVA. 2016. “Panorama Da Produção de Obras Em Terra Crua Com Design Contemporâneo Nos Últimos 60 Anos No Brasil.” 2. ° Congresso Internacional De História Da Construção

Luso-Brasileira.

- PINHEIRO, Renê. 2009. “Estudo Da Resistencia Do Tijolo de Adobe Com Adicao de Fibras Naturais de Coco Verde Para Habitacoes de Baixo Custo,” 59.
[http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2009/Estudo da Resistencia do Tijolo de Adobe com Adicao de Fibras Naturais de Coco Verde para Habitacoes de Baixo Custo.pdf](http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2009/Estudo%20da%20Resistencia%20do%20Tijolo%20de%20Adobe%20com%20Adicao%20de%20Fibras%20Naturais%20de%20Coco%20Verde%20para%20Habitacoes%20de%20Baixo%20Custo.pdf).
- PROJETEEE, Projetando Edificações Energeticamente Eficientes. 2020. “Estratégias Bioclimáticas.” 2020. <http://projeteee.mma.gov.br/estrategias-bioclimaticas/>.
- PROMPT, Cecília. 2008. “Curso de Bioconstrução.” Brasília: MMA.
- PROMPT, Cecília Heidrich. 2012. “Arquitetura de Terra Em Unidades Agrícolas Familiares: Estudo de Caso No Oeste Catarinense.”
- PROMPT, Cecília Heidrich, and Leandro Lima BORELLA. 2010. “Experiências Em Construção Com Terra No Segmento Da Agricultura Familiar.” In Terra Brasil. III Congresso de Arquitetura e Construção Com Terra No Brasil, Campo Grande–MS.
- RAMOS, Silva, and Cássia NOIA. 2016. A Construção de Políticas Públicas Em Habitação e o Enfrentamento Do Déficit Habitacional No Brasil : Uma Análise Do Programa Minha Casa Minha Vida.
- REES, Stephen William, Z ZHOU, and H R THOMAS. 2001. “The Influence of Soil Moisture Content Variations on Heat Losses from Earth-Contact Structures: An Initial Assessment.” *Building and Environment* 36 (2): 157–65.
- REMPEL, Alexandra R, and Alan W REMPEL. 2013. “Rocks, Clays, Water, and Salts: Highly Durable, Infinitely Rechargeable, Eminently Controllable Thermal Batteries for Buildings.” *Geosciences* 3 (1): 63–101.
- REMPEL, Alexandra R, and Alan W REMPEL. 2016. “Intrinsic Evaporative Cooling by Hygroscopic Earth Materials.” *Geosciences* 6 (3): 38.
- RIPPER, Lucas Alves. 2009. “Materiais Não-Convencionais Em Interatividade Com as Particularidades Socioambientais Do Território Carioca.” Rio de Janeiro: PUC-Rio. http://www.lambda.maxwell.ele.puc-rio.br/15726/15726_1.PDF.
- RODRIGUES, Thaisa C, Kelly F AIRES, Maximo A U GUTIÉRREZ, Lisandra F KREBS, and Eduardo G CUNHA. n.d. “A INFLUÊNCIA DO SOMBREAMENTO DE PAREDES E COBERTURA NO RESIDENCIAL,” no. 1: 1–10.
- RODRIGUEZ, A. S. C. 2016. “Qualidade Da Habitação Nos Assentamentos Rurais No PNHR/PMCMV Do Estado de São Paulo,” 188.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048762>.
- RODRIGUEZ, Angel Castañeda, and Akemi Ino. 2019. “A CASA CAMPONESA: Adequação Do PNHR Nos Assentamentos de Reforma Agrária No Estado de São Paulo.”
- RUANO, Alice, Aníbal COSTA, and Humberto VARUM. 2010. “Evolução Do Sistema Construtivo de Adobe Na Fábrica de Porcelanas Da Vista Alegre (1937-1945) TT - Evolution of the Constructive Adobe System in the Porcelain Industrial Unit of Vista Alegre (1937-1945).” *Conservar Patrimônio*, 49–69.
- SAMPAIO, Marcelly da Silva, Marcelo de Carvalho ALVES, Luiz Gonsaga de CARVALHO, and Luciana SANCHES. 2011. “Uso de Sistema de Informação Geográfica Para Comparar a Classificação Climática de Koppen-Geiger e de Thornthwaite Marcelly.” In *Anais XV*

Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR., 7934–41. Curitiba.

SANTOS, Roberto Eustaquio DOS. 2008. “A Armação Do Concreto No Brasil: História Da Difusão Da Tecnologia Do Concreto Armado e Da Construção de Sua Hegemonia.”

SHIMBO, Lúcia Zanin, and Akemi INO. 2005. “O Diálogo Entre Moradores e Arquitetos Sobre Materiais Construtivos Sustentáveis Para Habitação: Analisando Um Processo de Pesquisa-Ação.” CEP 13566: 570.

SHAH, Jami J., Santosh V. Kulkarni, and Noe Vargas-Hernandez. "Evaluation of idea generation methods for conceptual design: effectiveness metrics and design of experiments." J. Mech. Des. 122.4 (2000): 377-384.

SILVA, B. C.; R.; AMORIM, and A; CAVICCHIOLI. 2018. “Atlas Da Arquitetura Com Terra Na Região Metropolitana de São Paulo.” In 7º Congresso Brasileiro de Arquitetura e Construção Com Terra No Brasil. Rio de Janeiro.

SILVA, Cláudia Gonçalves Thaumaturgo da. 2000. “Conceitos e Preconceitos Relativos Às Construções Em Terra Crua.” Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz. Rio de Janeiro, 155.

SILVA, Fernando Machado Gonçalves da. 2007. “Análise Da Sustentabilidade No Processo de Produção de Moradias Utilizando Adobe e Bloco Cerâmico: Caso Do Assentamento Rural Pirituba II-Itapeva-SP.” Universidade de São Paulo.

SILVA, Fernando Machado Gonçalves DA, Mauricio Guillermo C BARRETO, Ioshiaqui SHIMBO, Akemi INO, and Obede Borges FARIA. 2006. “ANÁLISE DAS ETAPAS CONSTRUTIVAS DE UMA HABITAÇÃO RURAL COM PAREDES ESTRUTURAIS EM ADOBE. CASO: ASSENTAMENTO RURAL PIRITUBA II (ITAPEVA-SP).” In . Florianópolis, SC.

SORGATO, Marcio José. 2009. “Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente. 2009.” Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Faculdade de Engenharia Civil

SORGATO, Marcio José, Rogério VERSAGE, and Roberto LAMBERTS. 2011. “Sombrear Ou Não Sombrear Janelas.” Nota Técnica, no. 02: 4. www.labee.ufsc.br/publicacoes/notas-tecnicas/ 1.

SOUZA, Heloisa Maria Paes DE. 2016. “O Conforto Ambiental Na Arquitetura Colonial Brasileira: Heranças Muçulmanas.” ARCHITECTON-Revista de Arquitetura e Urbanismo 2 (3).

SOUZA, Inglez DE, and Diego BEJA. 2010. “Reconstruindo Cajueiro Seco: Arquitetura, Política Social e Cultura Popular Em Pernambuco (1960-64).” Universidade de São Paulo.

SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de, Carla Patrícia Santos SOARES, and Tatiana Paula ALVES. 2018. “Avaliação de Dispositivos de Sombreamento No RTQ-R Do Ponto de Vista Térmico e Luminoso.” Ambiente Construído 18 (4): 139–59. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400298>.

TSUTSUMI, H., Tanabe, S. I., Harigaya, J., Iguchi, Y., & Nakamura, G. 2007. Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid environment. Building and Environment, 42(12), 4034-4042.

VARUM, Humberto, Aníbal COSTA, Ana VELOSA, Tiago MARTINS, Henrique PEREIRA, and João ALMEIDA. 2005. “Caracterização Mecânica e Patológica Das Construções Em

- Adobe No Distrito de Aveiro Como Suporte Em Intervenções de Reabilitação.”
- VARUM, Humberto, Tiago MARTINS, and Ana VELOSA. 2005. “Caracterização Do Adobe Em Construções Existentes Na Região de Aveiro.”
- VEADO, Fernando Roberto. 2008. “Resgate Das Técnicas Construtivas e a Importância Dos Materiais Remanescentes Das Argamassas Utilizadas Nas Confeções Das Paredes de Barro e Dos Revestimentos Das Edificações Históricas - Uma Abordagem Epistêmica.” <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MMMD-8PDK6D>.
- VEADO, Fernando Roberto de Castro. 2008. “Resgate Das Técnicas Construtivas e a Importância Dos Materiais Remanescentes Das Argamassas Utilizadas Nas Confeções Das Paredes de Barro e Dos Revestimentos Das Edificações Históricas-Uma Abordagem Epistêmica.”
- WEIMER, Gunter. 2014. “Evolução Da Arquitetura Indígena.” Instituto Histórico e Geográfico Do Rio Grande Do Sul.
- WEIMER, Günter. 2005. *Arquitetura Popular Brasileira*. Martins Fontes.
- WESTPHAL, Fernando Simon. 2007. “Análise de Incertezas e de Sensibilidade Aplicadas à Simulação de Desempenho Energético de Edificações Comerciais.”