

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

LEONARDO RIBEIRO MAIA

Contribuição às construções em terra comprimida e compactada e
influências no conforto

São Paulo
2016

LEONARDO RIBEIRO MAIA

Contribuição às construções em terra comprimida e compactada e influências no conforto

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gil da Silva Andrade

São Paulo

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E-MAIL DO AUTOR: leonardo.maia@bol.com.br / leonardomaia@usp.br

Maia, Leonardo Ribeiro
M217c Contribuição às construções em terra comprimida e compactada e influências no conforto / Leonardo Ribeiro Maia. -- São Paulo, 2016.
137 p. : il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP.

Orientador: Antonio Gil da Silva Andrade

1.Arquitetura de terra 2.Conforto ambiental 3.Construções de terra
I.Título

CDU 691.4

Nome: MAIA, Leonardo Ribeiro

Título: **Contribuição às construções em terra comprimida e compactada e influências no conforto**

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gil da Silva Andrade

Aprovado em:

Data

Banca examinadora

Nome

Julgamento

Instituição

Assinatura

Nome

Julgamento

Instituição

Assinatura

Nome

Julgamento

Instituição

Assinatura

Um homem não pode construir uma casa, mas dez homens podem construir dez casas muito facilmente, mesmo centenas de casas. Precisamos de um sistema que permita o tradicional caminho de cooperação para o trabalho em nossa sociedade. Nós devemos aproximar a ciência e tecnologia da economia e do pobre e sem dinheiro. Devemos acrescentar o fator estético, não porque é mais barato construir a beleza, mas devemos acrescentar para respeitar o homem.

HASSAN FATHY

RESUMO

MAIA, L. R. **Contribuição às construções em terra comprimida e compactada e influências no conforto**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

Esta dissertação buscou analisar o espaço arquitetônico contemporâneo construído com as técnicas de Taipa de Pilão (terra compactada) e Blocos de Terra Comprimida (BTC) e sua influência no conforto dos ocupantes. A utilização da terra justifica-se na possibilidade do auxílio da melhoria da qualidade das edificações e desenvolvimento de sistemas construtivos econômicos e de alto desempenho, explorando suas qualidades e vantagens. Para isso, realizou-se a revisão bibliográfica sobre o material terra e sobre as técnicas de construção que o utilizam, além de apresentar o estado da arte (últimos 15 anos) dessas técnicas e sistemas construtivos, seus processos e avaliações. O trabalho analisou os fenômenos físicos referentes à transferência de calor e umidade e as questões subjetivas que envolvem o conforto nas diversas áreas onde o conceito esteja presente (arquitetura, filosofia, história, medicina, biologia, química e psicologia). Ao final, discutiu as soluções projetuais da arquitetura de terra contemporânea e concluiu que edificações construídas com terra podem proporcionar mais do que a neutralidade ("não desconforto") exigida pelas normas: proporciona aos ocupantes prazer, bem-estar, expressão de seu corpo e da cultura, além de expandir e evocar sentidos, emoções e sentimentos humanos e emocionar.

Palavras-chave: arquitetura de terra, conforto ambiental, construções de terra

ABSTRACT

MAIA, L. R. **Contribution to compressed and compacted earth buildings and influences on comfort.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

This dissertation aims to analyse the contemporary architectonic space built by Rammed Earth and Compressed Earth Blocs and their influence on users' comfort. The earth use is justified to improve the quality of buildings and development of economic and high-performance construction systems by exploring their qualities and advantages. To reach that, this work presents a literature review about the material "earth" and its building techniques. In addition, it presents the state-of-the-art of these techniques and building systems as well as their process and evaluations. Also, the work analyses the physical phenomenon of heat and humidity transfer and the subjective issues involving comfort in diverse areas that the concept could be presented (architecture, philosophy, history, medicine, biology, chemistry and psychology). Finally, it discusses the design solutions of the contemporary earth architecture. It concludes that earth-buildings can provide more than the neutrality ("not discomfort"), required by the regulations. These buildings provide pleasure, well-being, expression of body and represent the culture of their occupants. It evokes human senses and feelings that thrill us.

Keywords: earth architecture, environmental comfort, earth buildings

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.1: Escola de Artes Visuais da Universidade Autônoma Benito Juárez, em Oaxaca, México. Projeto de Maurício Rocha. Foto: Luís Gordo. 16
- Figura 1.2: Centro Cultural de Nk'Mip, construído em taipa de pilão em Osoyoos, Canadá. Projeto de Hotson Bakker Boniface Haden Architects. Foto: Nic Lehoux. 17
- Figura 1.3: Obra Labirinto (2015) da artista plástica Elisa Bracher, em paredes de taipa de pilão, exposta na Galeria Raquel Arnaud, executada pela empresa Taipal. Foto: Everton Ballardin..... 18

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1- Curva de Distribuição Granulométrica de um solo. Nesse exemplo, a amostra representa um solo com 29% de argila, 34% de silte, 35% de areia e 2% de pedriscos. Adaptado de Minke (2001). 23
- Figura 2.2 -Triângulo de Ferret, diagrama de classificação dos solos. Fonte: Neves et al (2009). ... 24
- Figura 2.3 - Estrutura laminar do argilo-minerais do solo. Adaptado de Minke (2001). 26
- Figura 2.4 - Estrutura dos três argilo-minerais mais comuns. Adaptado de Minke (2001). 27
- Figura 2.5 - Estados de consistência do solo e os limites de liquidez (LL), plástico (LP), de contração (LC), de retração (LR) e o índice de plasticidade (IP). 30
- Figura 2.6- Teste de retração (teste da caixa): a caixa da ilustração permite o ensaio de cinco amostras, simultaneamente, facilitando a comparação entre os resultados de retração. Fonte: Neves et al (2009). 33
- Figura 2.7 – Curva de compactação, adaptado de Minke (2001). 34
- Figura 2.8 - Metodologia para verificar a aptidão de um solo para ser estabilizado, adaptado de Burroughs, 2008. 37
- Figura 2.9 - Alteração na tensão ruptura à compressão de amostras de solos com adição de cimento Portland, adaptado de Minke, 2001. 38
- Figura 2.10 - Alteração na tensão ruptura à compressão de amostras de solos com adição de cal, adaptado de Minke, 2001. 39
- Figura 2.11 - Distribuição geográfica da arquitetura de terra, segundo *Auroville Earth Institute*, cadeira da UNESCO sobre arquitetura de terra. Fonte: site Earth-auroville 40
- Figura 2.12 – Vista da cidade de Shibam, no Yemen. A cidade conhecida como "Manhattan do deserto" possui edifícios construídos em terra de até oito pavimentos datados do século XVI. ... 40
- Figura 2.13 – Diagrama dos métodos fundamentais de construção com terra divididos em famílias, segundo Houben e Guillaud (1991), p. 163. 41
- Figura 2.14 - Residência em Piracicaba, SP, executada em taipa de pilão em 2014. Projeto do arquiteto Márcio V. Hoffman..... 44
- Figura 2.15 - Casa do Padre Inácio, construção bandeirista de 1753 na cidade de Cotia, São Paulo. Suas paredes "nascem" diretamente das fundações, também executadas com a técnica de taipa de pilão. Fonte: site Rota mogiana 45
- Figura 2.16 - Triângulo de Ferret com indicação dos teores de areia, silte e argila, indicados para a utilização do solo na construção de painéis monolíticos usando a técnica da taipa de pilão..... 46

Figura 2.17 - Escolha do tipo de estabilizante em função do índice de plasticidade (IP) e da distribuição granulométrica da terra. Fonte: Neves <i>et al</i> , 2009.	47
Figura 2.18 - Sistemas utilizando forma tipo caixa, guias fixa (em concreto) e móvel (em madeira). Fontes: site Recriar com você.	48
Figura 2.19 - Diversos compactadores utilizados para apiloar: manuais e mecânicos. Fonte: arquivo do autor; desenhos de Minke, 2001.	49
Figura 2.20 - Atividades de montar e aprumar a forma, espalhar a terra, compactar e desmontar a forma. Fonte: Neves e Faria, 2011.	50
Figura 2.21 - Residência em Jambuí (SP), projeto do arquiteto Ricardo Piva, executado com blocos de terra comprimida / solo-cimento. Fonte: arquivo Ricardo Piva.	53
Figura 2.22 - Prensa manual CINVA-RAM. Fonte: site Cedric-alby	54
Figura 2.23 - Exemplo de interpolação de resultados para definir a dosagem de cimento no BTC, nas proporções de cimento e terra de 1:7, 1:10 e 1:13. Fonte: Neves e Faria, 2011.	56
Figura 2.24 – Exemplos de BTC: furado com encaixe e maciço com reentrância. Fonte: arquivo do autor.	56
Figura 2.25 – Exemplos de prensas: duas manuais (esquerda) e duas hidráulicas (direita). Fonte: catálogo das empresas Sahara e Ecomáquinas.	57
Figura 2.26 – Processo de moldagem do BTC. Fonte: Neves e Faria, 2011.	58
Figura 2.27 - Exemplos de tipos de amarração dos BTC e reforço no canto.	59
Figura 2.28 – Construção de alvenarias de BTC com furos. Enchimento dos furos com a barra de aço e micro concreto. A imagem mostra também as instalações passando pelos furos. Projeto do arquiteto Ricardo Piva. Fonte: Arquivo Ricardo Piva.	59

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Etapas da tecnologia apropriada, adaptado de Abiko, 1980.	63
Figura 3.2 - Prismas já rompidos ao serem levantados apresentam aderência na área de ruptura. Fonte: Buson, Varum e Sposto (2010).	67
Figura 3.3 - Bloco com encaixes macho-fêmea e furos. Fonte: Fay e Ceppas (2012).	70
Figura 3.4 – Blocos articulados de solo-cimento do sistema LAMARS. Fontes: Mellace, Alderete e Arias (2002) e Rapisarda (2008).	71
Figura 3.5 - Plantas e cortes dos prismas parcialmente preenchidos e totalmente preenchidos. Fonte: J. Assis, Chahud e P. Assis, 2010.	72
Figura 3.6 - Taipa pré-fabricada sendo produzida e instalada na obra. Fonte: Mag e Rauch, 2011.	73

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Trocas secas de calor: condução, convecção e radiação. Fonte: Incropera et al, 2007, p.2.	80
Figura 4.2 – Curvas de absorção de uma parede interior com 11,5 centímetros com ambas as faces expostas a temperatura de 21°C, após um aumento súbito na umidade relativa do ar 50% a 80%. Fonte: Minke, 2001, p.21.	88
Figura 4.3 – Ciclos de absorção e liberação de umidade (entre 33%HR e 75%UR). Fonte: RODE et al. 2005, p.29.	89

Figura 4.4 - Parede em técnica de taipa de pilão numa casa em São Paulo. Suas camadas simulam os horizontes do solo, formados pelo intemperismo secular. Fonte: arquivo do autor.	93
Figura 4.5 - As mulheres da aldeia de Tera rebocam e pintam as paredes da casa do novo casal Katigura e Aganachi, em sua cerimônia de casamento. Fonte: Katigura y Aganachi, 2014.	95
Figura 4.6 - Construção de uma casa obus, no norte de Camarões. Fonte: site Arquitecturas de terra	97

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Princípios estratégicos divididos nos três âmbitos da sustentabilidade. Fonte: Correia <i>et al</i> , 2014.....	99
Figura 5.2: Processo construtivo da abóbada. Fotos: Ramón Aguirre.....	101
Figura 5.3: Pavilhão experimental projetado e construído pelo arquiteto Ramiro Meyer, em Lambaré, Paraguay. Fotos: Federico Cairoli.....	102
Figura 5.4: Desenhos, fotos e perspectiva do condomínio residencial em Guarulhos (SP). Os blocos de terra comprimida foram fabricados em diversos formatos e tem função de vedação; a estrutura metálica no encontro das paredes sustenta os arcos de cobertura construídos também com os BTC. Fonte: arquivo Ruy Arini.	103
Figura 5.5: Residências projetadas e construídas pelo arquiteto chileno Patricio Arias Cortéz (Surtierra), utilizando a técnica do tecno-barro. Casa Munita Gozalez (superior) e Casa Pirque (inferior). Fotos: site Sur Tierra Arquitectura	104
Figura 5.6: Escritório em fazenda em Taquaravaí (SP) - com painéis autoportantes em taipa de pilão e estrutura da cobertura em madeira laminada colada. Autores do projeto: Fernando Cesar Negrini Minto e Rafael Oliveira. Fotos: arquivo Fernando Cesar Negrini Minto.....	105

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1: Classificação granulométrica dos constituintes do solo.....	23
Tabela 2.2: Características do solo que devem ser atendidas conforme NBR 10833:2012	25
Tabela 2.3: Ordem de grandeza dos grãos de argila:.....	28
Tabela 2.4: Apresentação e classificação dos solos em função dos índices de plasticidade	31
Tabela 2.5: Limites de consistência para solos utilizados na construção:	31
Tabela 2.6: Classificação da plasticidade de um solo:	31
Tabela 2.7: Grau de atividade de uma argila	32
Tabela 2.8: Massa específica seca após compactação.....	35
Tabela 2.9: Classificação das técnicas de construção com terra quanto ao sistema/elemento construtivo:	43
Tabela 2.10 – Exemplo de teste para verificação da umidade ótima através da densidade mais elevada. No exemplo, a quantidade ótima de água é 5 litros para uma amostra de 60 litros de solo.	55
Tabela 2.11 - Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado	57

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1: Estudos de estabilização de solo-cimento	67
--	----

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1: Resistência térmica superficial interna e externa. Fonte: ABNT, 2005, p.07.....	81
Tabela 4.2 – Apresentação dos resultados dos cálculos.....	85
Tabela 4.3 - Avaliação do desempenho térmico através de simulação computacional, para dia típico de verão em São Paulo. Fonte: Orui, 2015.	85
Tabela 4.4 – Classificação de materiais de acordo com seu MBV. Adaptado de Rode et al (2005).89	
Tabela 4.5 – Dados e resultados dos ensaios de MBV. Adaptado de Rode <i>et al</i> (2005) e McGregor <i>et al</i> (2014).	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVO	18
1.3	METODOLOGIA E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
2	CONSTRUÇÃO COM TERRA: MATERIAL e TÉCNICAS	21
2.1	O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	21
2.1.1	Seleção do solo.....	21
2.1.2	Classificação granulométrica.....	22
2.1.3	Classificação mineralógica	25
2.1.4	Propriedades da terra.....	29
2.1.5	Estabilização do solo.....	35
2.2	TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO COM TERRA.....	39
2.2.1	Terra prensada ou taipa de pilão	44
2.2.2	Blocos comprimidos ou BTC.....	52
3	TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO COM TERRA	61
3.1	ESTUDOS SOBRE ESTABILIZAÇÃO, IMPERMEABILIZAÇÃO E DOSAGENS.....	64
3.2	DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE CONTROLE DE FABRICAÇÃO/EXECUÇÃO VISANDO A GARANTIA DA QUALIDADE DOS PRODUTOS.....	68
3.3	SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO, VISANDO AUMENTAR A PRODUTIVIDADE E DIMINUIR O ESFORÇO FÍSICO NO ATO DE CONSTRUIR.....	73
3.4	ELABORAÇÃO DE RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E PROJETOS ADEQUADOS ÀS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DA REGIÃO E TRADIÇÃO CULTURAL.....	75
4	CONFORTO DA CONSTRUÇÃO COM TERRA	78
4.1	DIMENSÃO FISIOLÓGICA.....	78
4.1.1	Influências das trocas térmicas secas no conforto térmico do interior da edificação.....	80
4.1.2	Resistência térmica superficial e condutância térmica superficial.....	80
4.1.3	Resistência térmica do componente e total.....	81
4.1.4	Coeficiente global de transmissão térmica ou transmitância térmica.....	83
4.1.5	Capacidade térmica dos componentes.....	83
4.1.6	Desempenho térmico segundo NBR 15575:2013	84
4.1.7	Influências da umidade no conforto térmico do interior da edificação.....	86
4.1.8	Higroscopia	87
4.2	DIMENSÃO NATURAL / GENÉTICA.....	90
4.3	DIMENSÃO PSICOLÓGICA	94
4.4	DIMENSÃO ESPACIAL.....	95
5	ESPAÇO ARQUITETÔNICO CONTEMPORÂNEO CONSTRUÍDO COM TERRA	98

6 CONCLUSÃO.....	106
6.1 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	109
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICES.....	120
APÊNDICE A: TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO COM TERRA.....	120
APÊNDICE B: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DOS COMPONENTES.....	131

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

A terra é um dos materiais naturais de construção mais abundante que se conhece e está disponível em todos os continentes do planeta. As técnicas construtivas que utilizam a terra como matéria-prima datam de 9000 a.C., e estima-se que cerca de 1/3 da população mundial habite casas construídas com alguma dessas técnicas (Minke, 2001).

A arquitetura vernacular ou tradicional utiliza para sua construção os materiais naturais recolhidos no próprio sítio ou proximidades. Além disso, aproveita intuitivamente o sol para a boa insolação, os ventos dominantes para ventilar melhor as habitações, as variações de temperatura etc. Os construtores conheciam os materiais, as técnicas e se apropriavam desse conhecimento a seu favor. A economia, tanto no ato de construir quanto na edificação habitada, sempre foi fator importante nas decisões de projeto e obra.

O uso da terra como material básico nas edificações, desde as primitivas autoconstruções até os dias de hoje, com o incremento de inovações tecnológicas – incluindo aí a industrialização – vem se tornando assunto frequente nas discussões acadêmicas.

Diversos congressos nacionais e internacionais discutem a atual produção científica e profissional da arquitetura e construção com terra. Como exemplos recentes, a Rede TerraBrasil promoveu, em 2014, seu 5º Congresso de Arquitetura e Construção com Terra em Viçosa (MG), com participação de pesquisadores e profissionais brasileiros e latino-americanos; a rede ibero-americana PROTERRA promove simpósios bianuais, congressos, encontros técnicos e outros eventos para difundir e discutir as atuais produções em arquitetura e construção em terra. Outros encontros científicos, não diretamente ligados à arquitetura e construção com terra, também citam o material e suas técnicas construtivas a partir do enfoque da reunião, como o ENCAC/ELACAC (Encontro Nacional e Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído), o ENTAC (Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído) e o ELECS (Encontro Latino-americano de Edificações e Comunidades Sustentáveis) que, em 2015, reuniu-se aos países da Península Ibérica e formou o Euro-ELECS, para citar alguns.

As atuais tecnologias da construção devem proporcionar inovações também nas edificações com terra, absorvendo o conhecimento empírico e vernacular do passado, ao mesmo tempo em que alavanca o desempenho dessas técnicas construtivas.

O questionamento do modelo de construção convencional aparece especialmente quando toca no ponto do consumo de energia para a obtenção do material, sua utilização na obra e no uso da edificação pelos seus ocupantes: a soma dessa energia gasta é chamada energia incorporada. "Numa época em que tanto se fala de sustentabilidade, é imperioso que se analisem as características dos materiais no seu ciclo de vida completo" (Schmidberger, 2007, p.1). Ainda segundo essa autora, a economia de energia deve ser levada em conta já no início do ato projetual, na definição dos parâmetros. Além da energia incorporada, outro dado importante que deve ser levado em conta na escolha dos materiais é a emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂, em todo seu ciclo de vida.

O aumento da população mundial e o crescente número de pessoas que tem acesso à eletricidade são os fatores principais para a projeção de crescimento da demanda de 40% de energia entre 2007 e 2030, provenientes de todas as fontes, como carvão, petróleo, nuclear, hidroelétrica etc. (IEA, 2009). Somente os edifícios, em todo o seu ciclo de vida, consomem mais de 40% de toda a energia produzida, além de emitir dióxido de carbono (Torgal e Jalali, 2012).

A escolha apropriada de materiais e técnicas de construção e de um projeto correto pode reduzir em 17% o consumo de energia e mais de 30% de emissões de CO₂ do edifício (Thormark *apud* Torgal e Jalali, 2012). Comparado à emissão incorporada de alvenarias, uma executada com blocos de concreto celular emite 17 vezes mais dióxido de carbono que outra executada com adobes (Lourenço *apud* Torgal e Jalali, 2012). A energia incorporada de um edifício de um pavimento construído com estrutura de concreto armado, alvenaria de blocos cerâmico e cobertura em laje pré-moldada com vigas de concreto armado e elementos vazados de cerâmica é o dobro de uma mesma edificação construída com alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC), vigas de concreto e cobertura em madeira (Shukla, Tiwari e Sodha *apud* Torgal e Jalali, 2012).

Um outro fator que aumenta os valores de energia e emissão incorporadas é o transporte dos materiais. O uso de materiais locais para a construção, como historicamente

acontece com a terra, promove um menor impacto ambiental e a diminuição dos índices acima citados.

Para Minke (2001), o preparo, o transporte e a construção propriamente dita com terra necessita somente cerca de 1% da energia incorporada, quando comparada com a construção convencional, que utiliza concreto armado ou tijolos cozidos. Nessa comparação, o projeto não foi levado em conta.

Outro fator importante a ser considerado no consumo de energia é a manutenção da temperatura dos edifícios num nível confortável aos ocupantes. Segundo Mascaró (2006), a ineficiência térmica dos materiais envolventes, no caso de edifícios climatizados artificialmente, deve ser compensada com grande utilização de energia, trazendo custos iniciais maiores (instalação de equipamentos e sistemas de condicionamento), além dos custos de operação e manutenção maiores, que poderiam ser evitados com paredes e/ou coberturas bem concebidas.

Orui (2014), ao citar a “Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo de Energia – Classe Residencial (PPH-2007)”, mostra que no setor residencial brasileiro, o uso de ar condicionado representa 20% do consumo de energia elétrica. Na região Sudeste, o uso do ar condicionado chega a representar 36,3% do consumo energético residencial, indicando o baixo desempenho térmico das habitações, das quais 97,6% são construídas de paredes de alvenaria (Eletrobrás, 2007).

A utilização da terra como material de construção contemporâneo mostra-se um contraponto ao sistema convencional. Edificações com terra crua podem armazenar calor por ser um material denso. Em regiões onde a amplitude térmica é alta, a terra crua pode balancear a temperatura dos ambientes interiores por vias passivas, diminuindo a quantidade de energia necessária à climatização artificial (Minke, 2001).

Estar confortável em relação a um acontecimento num espaço, observando-o ou sentindo-o, implica em não ter preocupações ou incômodos de nenhuma espécie. Segundo Frota e Shiffer (2009, p. 20), “o organismo humano experimenta sensação de conforto térmico quando perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, o calor produzido pelo metabolismo compatível com sua atividade”. Portanto estamos num ambiente físico confortável termicamente quando temos uma relação de neutralidade.

A ASHRAE-55 (2013) define o conforto térmico como o estado da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico, sendo sua avaliação subjetiva. Já a NBR-15220 (ABNT, 2005, p.5), define-o como “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente”. Schmid (2005, p.6) vai além, ao fazer a relação de conforto com prazer, o “conforto holístico, em que ocorre convergência entre os diferentes contextos do conforto: o físico, o ambiental, o psicoespiritual e o sociocultural”.

O conforto térmico possibilitado pela ação passiva do material e por técnicas passivas de climatização (ventilação cruzada, paredes grossas, insolação correta etc.) não necessita, ou necessita pouco, de fontes externas e ativas para executar a função do conforto térmico. Assim, a eficiência energética de uma construção de terra, com um projeto coerente e responsável, pode ser maior que a de uma edificação convencional: "o custo de operação destes sistemas [condicionamento artificial] pode ser bastante significativo em algumas edificações, especialmente em edifícios comerciais. Neste caso, o consumo de energia pode chegar a 60% de toda a energia consumida pela edificação" (Marques *et al*, 2007, p.131).

Existem diversos exemplos de arquitetura contemporânea de terra pelo mundo. De alta qualidade e com utilização de tecnologias inovadoras e apropriadas à cultura e ao local, edificações residenciais, pousadas, hotéis, restaurantes, centros culturais, lojas, entre outros, chamam a atenção e discutem o preconceito a respeito do material (Figura 1.1 e Figura 1.2).

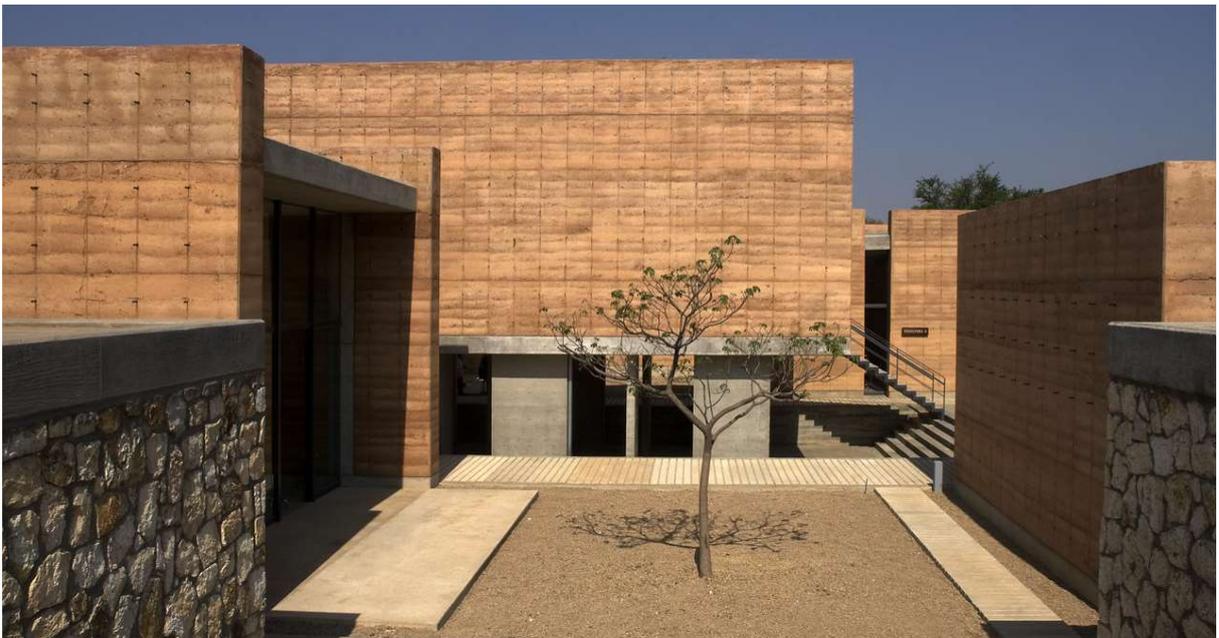


Figura 1.1: Escola de Artes Visuais da Universidade Autonoma Benito Juarez, em Oaxaca, México. Projeto de Maurício Rocha. Foto: Luís Gordo.



Figura 1.2: Centro Cultural de Nk'Mip, construído em taipa de pilão em Osoyoos, Canadá. Projeto de Hotson Bakker Boniface Haden Architects. Foto: Nic Lehoux.

Como dito anteriormente, a terra é um dos materiais de construção mais abundantes e largamente utilizados em todo o mundo, desde que o Homem iniciou a construção de seu habitat. Esse material tem capacidade e potencialidade para utilização na arquitetura e construções contemporâneas com qualidade, desempenho e eficiência, desde que utilizado de maneira correta.

Por ser um material versátil (respeitando suas limitações), a utilização da terra pode, desde auxiliar na melhoria da qualidade da habitação ordinária (entendida enquanto bem estar e qualidade de vida), desenvolver sistemas construtivos econômicos e de alto desempenho, até fazer parte de obras de arte (Figura 1.3), explorando suas qualidades e vantagens como: a abundância do material, o baixo custo de sua obtenção e execução (na maioria dos casos), a trabalhabilidade, as características físicas relativas a condições ambientais de temperatura e umidade etc.

O conforto ambiental possibilitado pela habitação de terra, por meio de um projeto correto e que condiz com o material, pode suprir as necessidades térmicas e promover, além do “não desconforto”, o “prazer” aos seus ocupantes. As características de acondicionamento passivas deixam de utilizar (ou diminuem o uso) da mecanização para tal função e, conseqüentemente, resultam em menor consumo de energia.

A arquitetura contemporânea em terra apresenta exemplares de qualidade estética, estrutural, com respeito ao conforto ambiental, ao meio ambiente e ao usuário. Esse material de construção de excelência pode ser utilizado de maneira sofisticada e inventiva, desde que não se perca em fetichismo ou modismo e nem seja encarado como a panaceia para a sustentabilidade. Portanto, faz-se necessário o aprofundamento do estudo sobre suas propriedades físicas, químicas, seus processos e técnicas construtivas, bem como a crítica à arquitetura contemporânea construída com terra e suas relações com o conforto do usuário e com o meio ambiente, de maneira ampla e sistêmica.

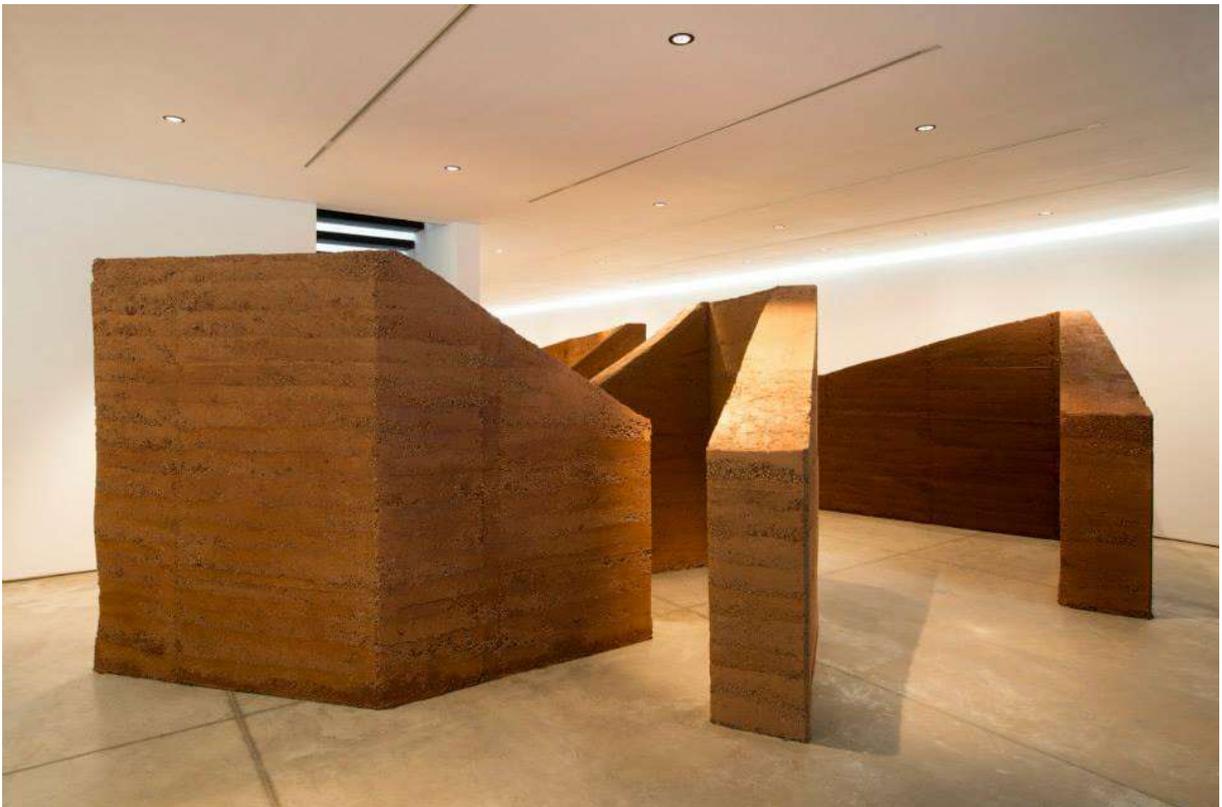


Figura 1.3: Obra Labirinto (2015) da artista plástica Elisa Bracher, em paredes de taipa de pilão, exposta na Galeria Raquel Arnaud, executada pela empresa Taipal. Foto: Everton Ballardin.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral da pesquisa é analisar o espaço arquitetônico contemporâneo construído com as técnicas de Taipa de Pilão (terra compactada) e Blocos de Terra Comprimida (BTC) e sua influência no conforto dos ocupantes. Para isso, os objetivos específicos são:

- estudar o material de construção – terra – e as técnicas de construção que o utilizam;

- pesquisar e analisar o estado da arte das técnicas e sistemas construtivos, seus processos e avaliações;
- estudar e analisar os fenômenos físicos referentes à transferência de calor e umidade nas paredes e nos ambientes;
- discutir as questões subjetivas que envolvem o conforto do ser humano e o prazer de estar em um lugar;
- apresentar e discutir as soluções projetuais da arquitetura de terra contemporânea.

1.3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A metodologia utilizada nesse estudo foi a revisão crítica da literatura, (revisão opinativa), tanto na literatura específica de construção com terra, quanto nas mais diversas áreas nas quais o conceito de conforto possa estar presente. O referencial teórico, feito pela revisão bibliográfica dos principais textos que tratam da construção com terra, é conteúdo dos Capítulos 2 e 3.

O Capítulo 2 - Construção com Terra: Material e Técnicas trata do material terra, suas características e propriedades, além da seleção do solo e os conceitos fundamentais da estabilização; na sequência, são expostas as técnicas de taipa de pilão e bloco de terra comprimida (BTC), suas generalidades, métodos e procedimentos de execução, exigências técnicas e formas de controle de qualidade dos componentes e edificações.

O Capítulo 3 – Tecnologia na Construção com Terra trata da tecnologia e tecnologia apropriada e sistematiza, o estado da arte das inovações tecnológicas da taipa de pilão e dos blocos de terra comprimida, no contexto ibero-americano, nos últimos 15 anos.

A revisão crítica-opinativa funde-se à análise e discussão do tema de conforto e da arquitetura contemporânea de terra nos capítulos seguintes, divididos como segue.

O Capítulo 4 - Conforto na Construção com Terra abrange diversas áreas do tema conforto, não somente na arquitetura e construção, mas também na filosofia, história, medicina, biologia, química e religião. São apresentados os conceitos físicos e parâmetros normativos para o cálculo do desempenho térmico dos componentes da edificação (as paredes) e discute o conforto ambiental da habitação edificada com terra, de maneira holística e sistêmica, tratando do conforto do corpo físico e do conforto da alma enquanto prazer e bem-estar cultural e psíquico.

O Capítulo 5 – Espaço Arquitetônico Contemporâneo Construído com Terra analisa e discute a arquitetura contemporânea edificada com terra, os principais conceitos e parâmetros, ressaltando a importância de aprender com o passado e inovar, buscar soluções formais que cheguem ao limite do material e que permitam aos usuários aproveitar o conforto ambiental gerado.

O Capítulo 6 - Conclusão apresenta as considerações finais desse estudo, agregando as discussões precedentes. Também apresenta sugestões para pesquisas futuras.

2 CONSTRUÇÃO COM TERRA: MATERIAL E TÉCNICAS

2.1 O SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

O solo cobre boa parte da superfície dos continentes e é produto da decomposição das rochas da crosta terrestre, por meio da "pulverização de rochas provocada pelo movimento glacial, da água e do vento, pela expansão e contração térmica de rochas ou pela expansão da água congelada em fendas nas rochas" (Minke, 2001, p. 23). Segundo Pinto (2006), esse conjunto de processos forma o solo (com uma mistura de partículas pequenas que são diferenciadas pelo tamanho e composição química) e atuam mais em climas quentes do que em climas frios. A composição química e diversidade das propriedades do solo dependem de onde ele se encontra, da rocha originária, da latitude, longitude, altitude, clima predominante e tempo exposto às intempéries locais (Neves *et al*, 2009).

O solo pode ser definido como material solto, natural da crosta terrestre e que proporciona diversos usos, desde o plantio para agricultura e material para construção até terapias medicinais. Sua definição depende basicamente da área de conhecimento que o emprega. Na arquitetura e engenharia, o solo é um material granular composto de rocha decomposta, vazios (água e ar) e eventualmente matéria orgânica, que pode ser escavado sem o auxílio de explosivos; também denominado como terra crua, terra sem cozer, terra para construir (Pinto, 2006; Neves *et al*, 2009). Será adotado neste estudo o termo terra, correspondente ao solo apropriado à construção.

2.1.1 Seleção do solo

De maneira geral, as técnicas de construção com terra utilizam o material de duas formas: com a adição de pouca água, formando uma farofa úmida que será prensada ou comprimida, ou com adição de quantidade maior de água, formando um "barro" que será utilizado na consistência mais plástica.

A utilização da terra retirada do próprio terreno onde a edificação será construída é, a princípio, a opção de menor impacto ambiental, menos custosa e mais rápida. Para tanto, esse solo deve passar por testes e ensaios para verificar suas propriedades e características.

Os tradicionais mestres construtores adquiriram experiência na seleção dos solos e na mistura entre eles. Com testes expeditos, feitos no próprio local, eles são capazes de distinguir

um tipo de terra de outra e, como conhecem as propriedades de cada uma, as misturam na proporção necessária para sua utilização como material de construção. Para tanto, estes procedimentos prescindem enorme experiência e não oferecem a precisão dos ensaios normatizados.

Auxiliando na seleção e eventuais misturas de solos, diversos autores produziram tabelas de referência para as principais propriedades da terra. Cada técnica construtiva exige determinados parâmetros das propriedades da terra. Neves *et al* (2009, p. 12) lembram que "em geral, os fatores de decisão estão mais relacionados com a cultura e tradição no processo de construção, do que com o tipo de solo disponível". Cada característica e recomendação do uso da terra para a construção será abordada a seguir.

2.1.2 Classificação granulométrica

Existem diversas classificações dos solos e cada uma das áreas de conhecimento trata com mais ou menos importância certas classificações. O objetivo de classificá-los é o de estimar seu provável comportamento, sua origem, suas características físicas e químicas e propriedades. As propriedades mais importantes da terra para o uso na construção são: composição granulométrica e mineralógica, índices de consistência, retração e grau de compactação.

A terra é constituída basicamente de água, matéria orgânica e minerais. Para o seu emprego como material de construção, a matéria orgânica deve ser completamente descartada. Sua porção mineral pode ser agrupada em função das dimensões dos grãos e cada agrupamento (ou faixa de dimensões) possui características distintas. As partículas contidas em cada faixa são classificadas como: pedregulho, areia, silte e argila, sendo a areia também subdividida e classificada como grossa, média e fina (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Classificação granulométrica dos constituintes do solo

Classificação das partículas	Dimensão dos grãos d (mm)	Características principais
Pedregulho	$2,0 \leq d \leq 60$	Elemento inerte e resistente
Areia grossa	$0,6 \leq d < 2,0$	Elemento inerte,
Areia média	$0,2 \leq d < 0,6$	não coesivo e
Areia fina	$0,06 \leq d < 0,2$	não plástico
Silte	$0,002 \leq d < 0,06$	Sem coesão e plasticidade, diminui a resistência da areia
Argila	$d < 0,002$	Possui forte coesão e plasticidade, sem estabilidade volumétrica, expande na presença de água; apresenta propriedades físicas e químicas bastante variadas segundo sua origem

Fonte: Adaptado de Neves e Faria (2011) e ABNT (1995)

A Curva de Distribuição Granulométrica (Figura 2.1) representa a relação entre as dimensões das partículas presentes numa determinada amostra e a quantidade relativa e acumulativa ao todo. Dependendo de qual componente é a predominante, pode-se classificar como solo argiloso, siltoso ou arenoso, ou uma mistura de dois componentes mais predominantes como solo silte-argiloso ou areno-siltoso.

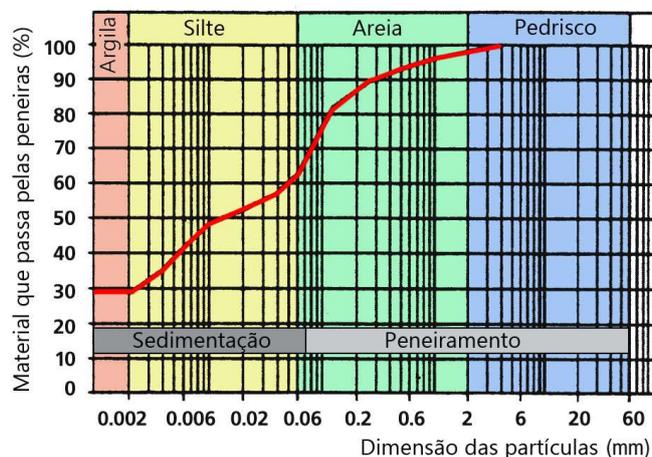


Figura 2.1- Curva de Distribuição Granulométrica de um solo. Nesse exemplo, a amostra representa um solo com 29% de argila, 34% de silte, 35% de areia e 2% de pedriscos. Adaptado de Minke (2001).

A Curva de Distribuição Granulométrica é determinada por meio de dois ensaios, descritos na NBR-7181 - Solo - Análise Granulométrica. Segundo a Norma, o primeiro ensaio "permite a classificação das partículas de tamanho maior que 0,075 mm" (ABNT, 1995, p.13).

O segundo é o de sedimentação, que determina a distribuição granulométrica das partículas mais finas como argila e silte (diâmetros inferiores a 0,075mm).

Após os ensaios concluídos e determinada a Curva de Distribuição Granulométrica, pode-se obter a classificação granulométrica do solo com o auxílio do Triângulo de Feret (Figura 2.2). Nesse gráfico, com as demarcações das quantidades de argila, silte e areia da amostra, identifica-se qual é o tipo de terra. Isso auxiliará na escolha mais adequada da técnica de construção ou o quanto precisará ser adicionado de determinado material para o correto uso da técnica.

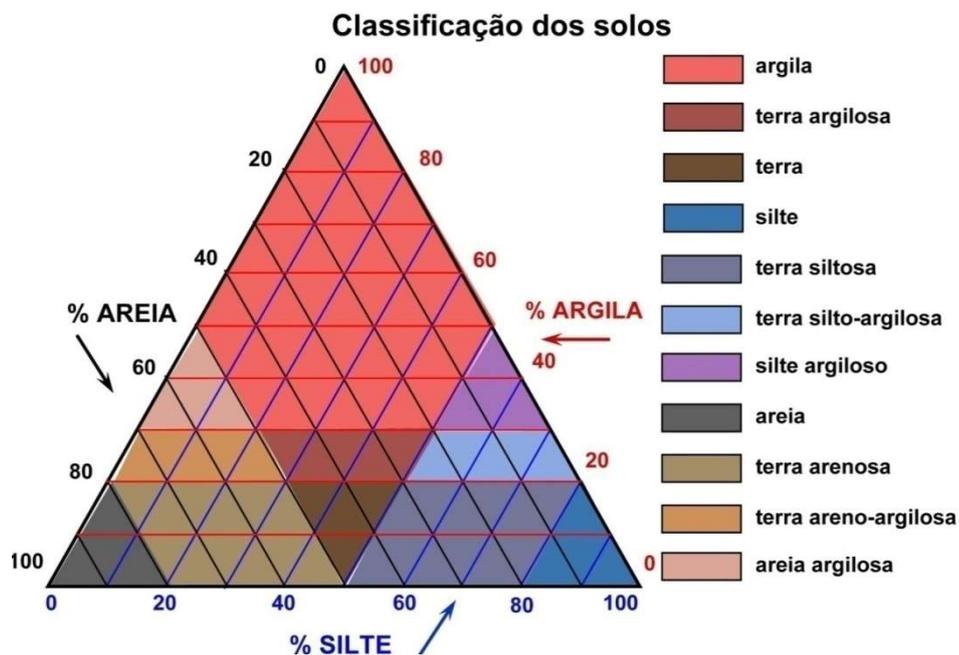


Figura 2.2 -Triângulo de Ferret, diagrama de classificação dos solos. Fonte: Neves et al (2009).

Depois de verificado o excesso de algum componente ou falta de outro na amostra, é possível fazer uma mistura de solos para obter um material com as propriedades ideais para a técnica de construção que será utilizada ou auxiliar nessa escolha.

Quando uma amostra não apresenta valores dentro das recomendações gerais para a construção com terra (mínimos de 45% de areia, 55% de silte e argila e máximos de 80% de areia e 20% de silte e argila), a adição e mistura de outro solo com granulometria diferente pode resultar num material de características ideais. Além da composição granulométrica, outras propriedades podem ser alteradas com a adição de um ou mais solos à jazida principal. Essas recomendações gerais devem ser mais restritivas em função da técnica escolhida para a

construção. Esse procedimento é um dos tipos de estabilização de solos, tema que será tratado adiante.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2012b) especifica na NBR 10833:2012 - Fabricação de tijolos maciços de solo-cimento com a utilização de prensa manual ou hidráulica - as seguintes características referentes aos blocos e painéis monolíticos comprimidos (Tabela 2.2):

Tabela 2.2: Características do solo que devem ser atendidas conforme NBR 10833:2012

Característica	Recomendação
% passando pela peneira 4,75mm (areias e mais finos)	100%
% passando pela peneira 0,075mm (silte e argila)	10% a 50%

Fonte: ABNT, 2012b.

2.1.3 Classificação mineralógica

A constituição mineralógica das partículas do solo depende da composição da rocha mãe que as originou. Segundo Pinto (2006), o quartzo, presente na maioria das rochas, forma grãos de areias e siltes (partículas como cubos ou esferas), é resistente à degradação e mostra pouca atividade superficial. Sua composição química é SiO_2 . Além do quartzo, outros minerais também são encontrados nesse tamanho: mica, feldspato, calcita e gibbsita.

Os minerais mais atacados pelo intemperismo são os feldspatos, que originam os argilo-minerais. Essas partículas constituem a fração mais fina do solo, com dimensões inferiores a 2mm. Além do tamanho reduzido, a constituição mineralógica faz com que essas partículas se comportem extremamente diferente das frações de silte e areia (Pinto, 2006). Nos solos tropicais (originários de locais que apresentam características tropicais e úmidas), a porção de argila é fundamentalmente composta dos argilo-minerais devido ao processo de laterização.

2.1.3.1 Argila

Segundo a NBR 6502:1995 (ABNT, 1995), argila é "solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade" (ABNT, 1995, p. 9). A argila é formada por substâncias orgânicas (húmus e microrganismos) e inorgânicas, sendo as últimas os argilo-minerais e outros minerais não argilosos como

hidróxidos de ferro e alumínio, quartzo, mica, feldspatos, calcita e outros. Conforme já visto, toda a parte orgânica do solo deve ser descartada para o uso do material na construção civil.

Os argilo-minerais, silicatos hidratados de alumínio, são formados basicamente por camadas de sílica (SiO_2) e hidróxido de alumínio ($\text{Al}_2(\text{OH})_3$) e geralmente têm uma estrutura cristalina lamelar hexagonal. Segundo Minke (2001), estas lâminas são compostas por diferentes camadas que geralmente formam-se em torno de um núcleo de silício ou alumínio. No caso do silício, estes estão rodeados por átomos de oxigênio, e no caso do alumínio por grupos de hidróxidos (OH). As camadas de óxido de silício têm uma forte carga negativa que leva a alta coesividade interlamelar (Figura 2.3).

A maioria dos argilo-minerais tem cátions intercambiáveis e o tipo e quantidade dos cátions definem a capacidade aglutinante e a resistência à compressão do solo. Segundo Pinto (2006), esses cátions atraem as camadas adjacentes, mas com força não suficiente à impedir a entrada de água entre elas. A elevada capacidade de absorção de água, a expansão quando em contato com água e a retração ao secar de certas argilas vem da liberdade de movimento das camadas. Na presença de água, os hidróxidos e óxidos hidratados que recobrem os argilo-minerais exercem a função de agentes cimentantes naturais entre as partículas do solo.

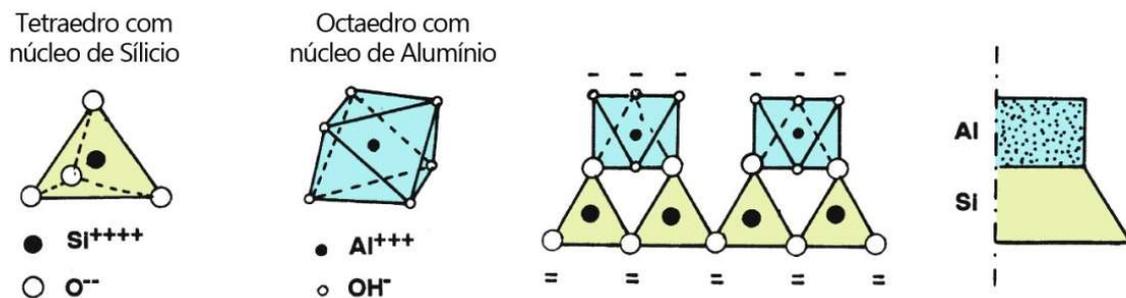


Figura 2.3 - Estrutura laminar do argilo-minerais do solo. Adaptado de Minke (2001).

Os grupos de argilo-minerais mais comuns usados para a construção com terra (Figura 2.4 e Tabela 2.3) são formados por essa estrutura laminar com uma ou mais camadas empilhadas e, em alguns casos, com acréscimo ou troca de elementos químicos (Minke, 2001; Pinto, 2006):

- **Caolinitas** - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$: são formadas por duas camadas da estrutura laminar e tem uma baixa capacidade de ligação uma vez que cada camada de hidróxido de alumínio é ligada apenas a uma camada de óxido de silício. Isso ocorre devido às

camadas “firmemente empacotadas, com ligações de hidrogênio que impedem sua separação e a introdução de moléculas de água entre elas” (Pinto, 2006, p.17);

- Esmectitas (principalmente montmorilonitas)- $(Ca, Na, H)(Al, Mg, Fe, Zn)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$: são formadas por uma camada de $Al_2(OH)_3$ e duas camadas de sílica. O alumínio pode ser substituído por Manganês ou Ferro, resultando cores de marrom ou amarelo e vermelho respectivamente. A água penetra com grande facilidade, dando as características de expansividade e de alta plasticidade. Isso porque as moléculas de água ficam entre as camadas estruturais da partícula e aumentam a distância basal, até a total liberdade dessas camadas;
- Ilitas - $(K, H)Al_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$: possuem a mesma estrutura da esmectita, com a diferença de sua sílica ser parcialmente substituída por potássio, absorvendo cátions (K^+) para neutralizar sua carga negativa graças à substituição. Devido a presença de íons de potássio, não absorvem água entre as camadas e, portanto, não são expansivas em contato com água, tem baixa plasticidade e difícil dispersão. Possuem comportamento intermediário entre a caolinita e a esmectita perante a água.

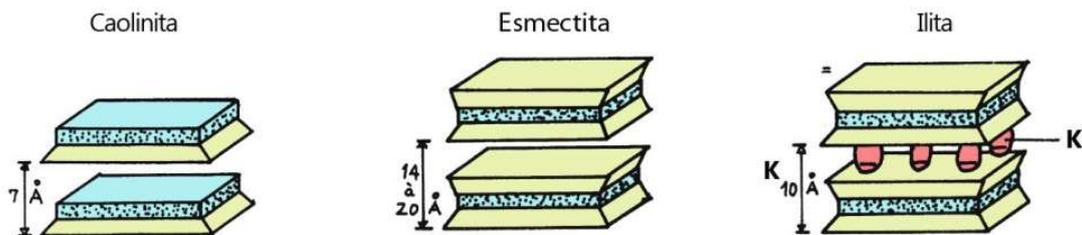


Figura 2.4 - Estrutura dos três argilo-minerais mais comuns. Adaptado de Minke (2001).

Tabela 2.3: Ordem de grandeza dos grãos de argila:

$1 \text{ \AA} = 10^{-10}\text{m}$	Caolinita	Esmectita	Ilita
Distância interplanar \AA	7	14 a 20	10
Comprimento e largura \AA	10.000	500	1.000
Espessura \AA	50 a 2.000	10 a 200	50 a 500
Área superficial específica	5 a 10 m^2/g	80 a 800 m^2/g	80 m^2/g
Variação com umidade	Bastante estável	Frequentemente muito instáveis (inchaço)	

Fonte: Adaptado de CRATerre (1979) e Pinto (2006).

2.1.3.2 Silte e areia

O silte e a areia são materiais completamente diferentes da argila. Composto por partículas de diâmetro entre 0,002 e 0,06mm, o silte é formado a partir da rocha original. Também chamado de "poeira de pedra", é constituído principalmente de minerais primários, principalmente, quartzo (SiO_2) e, por isso, é considerado um pseudo-agregado ou agregado de quartzo e argila. Possui partículas de certos minerais como materiais ferruginosos e calcários e minerais de argila como a vermiculita. A olho nu, não é possível diferenciar o silte das argilas, mas essas duas frações de um solo podem ser separadas em função da pouca ou nula plasticidade do silte (Pinto, 2006; Neves *et al*, 2009).

A NBR 6502:1995 define o silte como "solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco ao ar. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração silte." (ABNT, 1995, p. 17). Quando expostas a diferentes níveis de umidade eles incham e encolhem, mudando sensivelmente em volume.

A dimensão da areia varia entre 0,06 e 2mm e confere estabilidade ao solo (como os pedriscos). Quando seca não apresenta coesão, mas tem fricção interna muito elevada, isto é, grande resistência mecânica à movimentação entre as partículas que os compõem, segundo Rigassi e CRATerre (1985). Quando umedecida, no entanto, apresenta coesão aparente como resultado da tensão de superfície da água que ocupa os espaços vazios entre as partículas. A NBR 6502:1995 (ABNT, 1995) ainda cita que a areia possui propriedade não plástica.

Areias e siltes, portanto, são caracterizados pela sua estabilidade na presença de água. Quando secos, possuem muito pouca ou nenhuma coesão e, portanto, não podem ser usadas isoladamente como principais materiais para a construção com terra.

2.1.4 Propriedades da terra

As propriedades da terra mudam dependendo das frações de cada componente constituinte, de sua composição química e da forma complexa em que estas se misturam. A fração de uma partícula dominante ou da junção de duas partículas distintas é o que caracteriza as propriedades fundamentais e determina seu comportamento. Segundo Rigassi e CRATerre (1985), é possível distinguir os solos pelas propriedades químicas, que estão ligadas à presença de sais, óxidos e sulfatos, ou pelas propriedades físicas, que incluem cor, estabilidade estrutural, a aderência, a densidade aparente seca, teor de umidade, porosidade ou porcentagem de vazios, retração e muitos outros.

Compreender as propriedades químicas e físicas permite que se defina a qualidade e o desempenho de uma terra. Para isso, Rigassi e CRATerre (1985) e Neves e Faria (2011) sugerem que, para o uso na construção, seja feita a investigação mais minuciosa das seguintes propriedades:

- na seleção do solo: composição granulométrica, índices de consistência e retração;
- no controle da execução: grau de compactação e umidade.

2.1.4.1 Índices de consistência

A plasticidade de um solo define o quanto ele pode ser distorcido sem deformação plástica significativa, ou seja, sem rachaduras ou o colapso. Os estados de consistência do solo (sólido, semissólido, plástico e líquido) variam nitidamente segundo o grau de umidade e são definidos por meio de ensaios e índices desenvolvidos pelo cientista sueco Atterberg (Neves *et al*, 2009). A quantidade e o tipo de argila presente influenciam no aspecto e na consistência do solo, conforme a quantidade de água que contém.

Os teores de água que correspondem às alterações de estado da amostra são definidos como Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade (Figura 2.5). Os ensaios para a constatação dos limites são realizados somente com a porção fina do solo (partículas menores que 0,42mm, ou seja, parte da areia fina, silte e argila).

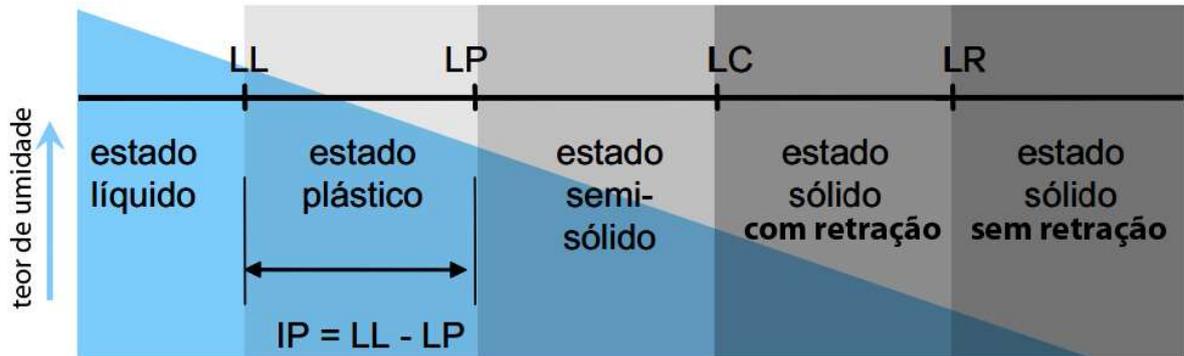


Figura 2.5 - Estados de consistência do solo e os limites de liquidez (LL), plástico (LP), de contração (LC), de retração (LR) e o índice de plasticidade (IP).

O Limite de Liquidez (LL) define a quantidade de água na qual um solo passa do estado líquido para o plástico, ou seja, perde sua capacidade de fluir. A NBR 6459:1984 prescreve os procedimentos para o ensaio de Limite de Liquidez, que utiliza o Aparelho de Casagrande.

O Limite de Plasticidade (LP) determina o grau de umidade no qual o solo passa da consistência plástica para um estado semissólido ou quebradiço. O ensaio é descrito na NBR 7180:1984 e define o menor teor de água quando se pode moldar um cilindro de 3mm de diâmetro sobre uma placa de vidro.

Os Limites de Liquidez e de Plasticidade determinam o Índice de Plasticidade (IP) do solo segundo a diferença entre eles, sendo: $IP = LL - LP$. Segundo Neves *et al* (2009), os Limites de Liquidez e de Plasticidade dependem, geralmente, da quantidade e da composição mineralógica de argila, enquanto o Índice de Plasticidade depende unicamente da quantidade de argila do solo, uma vez que é um valor relativo. Esses autores ainda citam que, na prática, a caracterização de um solo pode ser feita pelo seu Limite de Liquidez e de seu Índice de Plasticidade. Pinto (2006, p.26) apresenta resultados típicos de alguns solos brasileiros na Tabela 2.4 e Neves *et al* (2009) classifica conforme granulometria predominante.

Tabela 2.4: Apresentação e classificação dos solos em função dos índices de plasticidade

Solo	IP (%)	LL (%)
Residuais de arenito (arenosos finos)	11-20	29-44
Residual de gnaise	20-25	45-55
Residual de basalto	20-30	45-70
Residual de granito	14-18	45-55
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	30	70
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	80	120
Argila porosa vermelha de São Paulo	25-40	65-85
Argilas variegadas de São Paulo	15-45	40-80
Areias argilosas variegadas de São Paulo	5-15	20-40
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	42	64
Arenoso	0 a 10	0 a 30
Siltoso	5 a 25	20 a 50
Argiloso	> 20	> 40

Fonte: Pinto (2006) e Neves *et al* (2009).

Para a utilização da terra como material de construção, CRATerre (1979) apresenta os seguintes parâmetros quanto aos limites de consistência do solo (Tabela 2.5):

Tabela 2.5: Limites de consistência para solos utilizados na construção:

Índice	Mínimos e máximos	Recomendados
Índice de Plasticidade	5 a 29	7 a 18
Limite de Liquidez	25 a 50	30 a 35
Limite de Plasticidade	10 a 25	12 a 22
Limite de Retração	8 a 18	< teor de água ótimo

Fonte: Adaptado de CRATerre (1979).

Dessa forma, os autores recomendam a utilização de solos com Índices de Plasticidade Médio a Fraco (Tabela 2.6):

Tabela 2.6: Classificação da plasticidade de um solo:

Índice de Plasticidade	Classificação
5 a 10	Fraco
10 a 20	Médio
> 20	Forte

Fonte: Adaptado de CRATerre (1979).

A Norma NBR 10833:2012 (ABNT, 2012b) especifica os seguintes valores para os índices de consistência referentes aos blocos e painéis monolíticos comprimidos: Limite de Liquidez inferior ou igual a 45% e Índice de Plasticidade inferior ou igual a 18%

Para um melhor entendimento do comportamento da argila de um solo, uma vez que o Índice de Plasticidade é um valor relativo, Houben e Guilaud (1991) apresentam o Índice de Atividade (AC) da argila. Alguns solos com teores elevados de argila “podem apresentar índices [de consistência] mais baixos do que aqueles com pequenos teores de argila. Isso pode ocorrer porque a composição mineralógica dos argilo-minerais é bastante variável” (Pinto, 2006, pg. 26). O Índice de Atividade é calculado pela Equação 2.1 e verificado na

Tabela 2.7:

$$\text{Índice de atividade} = \frac{\text{Índice de Plasticidade (IP)}}{\text{fração de argila (menor que 0,002mm)}} \quad (2.1)$$

Tabela 2.7: Grau de atividade de uma argila

Tipo de argila	Índice de Atividade da argila
Pouco ativa	< 0,75
Normal	0,75 – 1,25
Ativa	1,25 – 2,0
Muito ativa	> 2,0

Fonte: Houben e Guilaud (1991)

2.1.4.2 Retração

A expansão dos grãos de argila em contato com a água e sua retração quando secos podem ser uma desvantagem da terra enquanto material de construção, segundo Minke (2001).

Neves *et al* (2009) alertam para que, nas paredes de terra, a quantidade e o tipo de argila (verificado pelo Índice de Atividade da argila) são os responsáveis pelos movimentos de retração e expansão quando submetidos às variações de umidade, podendo provocar “fissuras, que podem gerar lesões internas e/ou superficiais, permitindo a penetração de água e a ocorrência de manifestações patológicas” (Neves *et al*, 2009, p. 10). Como consequência, o material perde sua resistência e a parede pode se degradar. Como já visto, a esmectita sofre um efeito maior do que a caulinita e a ilita, e a distribuição granulométrica também interfere nesse processo.

O Limite de Retração (LR) estabelece a mudança do estado sólido com retração para o estado sólido sem retração. É determinado pelo teor de umidade a partir do qual o volume do solo não se altera, quando somente a evaporação livre da água se processa. Conforme CRATERre (1979), quando o teor de água é reduzido por evaporação, o volume diminui de forma praticamente linear. Quando os grãos estão em contato, o volume para de diminuir, enquanto o teor de água interlamelar continua em declínio, porém a retração sucede com o surgimento de fissuras.

Um teste de campo reconhecido para a determinação da retração do solo é o Teste da Caixa (Figura 2.6). Neves *et al* (2009) apresentam um parâmetro de avaliação segundo o BNH (Banco Nacional da Habitação, 1985) e o CEPED (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, 1984): para a fabricação de blocos de terra comprimida e painéis monolíticos é recomendada a retração total não ultrapassar 20mm, numa caixa com compartimentos de 8,5cm de largura, 3,5cm de altura e 60cm de comprimento.



Figura 2.6- Teste de retração (teste da caixa): a caixa da ilustração permite o ensaio de cinco amostras, simultaneamente, facilitando a comparação entre os resultados de retração. Fonte: Neves *et al* (2009).

2.1.4.3 Grau de compactação e umidade

A compactação de uma terra é a capacidade que esta tem de diminuir seu volume conforme sofre pressão de compactação, i.e., quando é submetida a determinado esforço.

Para que a compactação seja eficaz (compactação máxima) cada tipo de terra deve conter um determinado teor de água, denominado Umidade Ótima de Compactação. Conforme Houben e Guillaud (1989), se o teor de água é elevado, a argila irá inchar e o compactador de pressão não conseguirá diminuir o volume total da amostra; se a umidade é

baixa, a lubrificação dos grãos é insuficiente e a terra pode não ser comprimida ao seu volume mínimo. Neves *et al* (2009, p.11) cita que, na condição de umidade ótima, a terra apresenta menor porosidade e menor permeabilidade, “caracterizando assim uma matéria mais durável e mais resistente mecanicamente”. Por outro lado, Minke (2001) afirma que, na construção em terra, o alto grau de compactação e, portanto, a umidade ótima, não leva a terra à máxima resistência à compressão. O autor recomenda que a terra não seja usada com o teor de umidade ótimo, mas sim com um teor de água ligeiramente maior do que o ótimo. A recomendação provavelmente leva em consideração o efeito da evaporação durante o processo de construção.

A *umidade ótima de compactação* é determinada por meio do Ensaio de Compactação ou Ensaio de Proctor, cuja metodologia foi desenvolvida pelo engenheiro americano Ralph Proctor, em 1933, e é descrita no Brasil pela norma NBR 7182:1986 - Ensaios de Compactação. Com posse dos resultados, define-se a umidade ótima de compactação do solo obtida pela curva que indica qual é a maior massa específica da amostra (Figura 2.7).

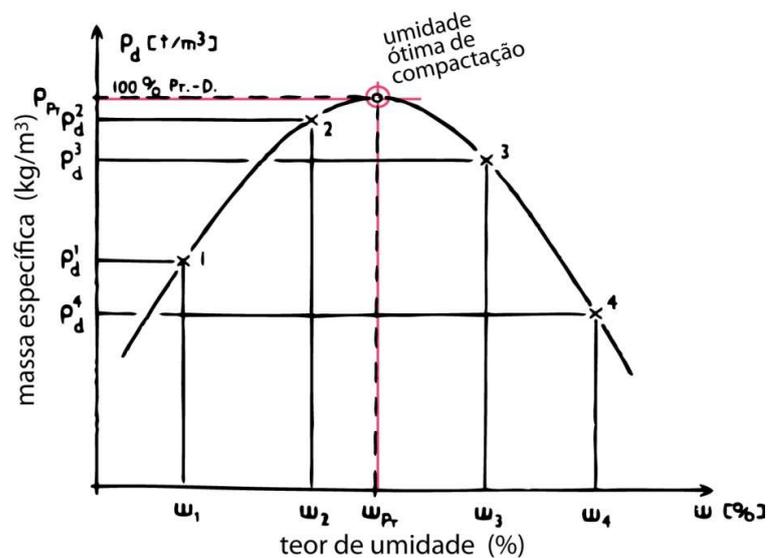


Figura 2.7 – Curva de compactação, adaptado de Minke (2001).

Para as recomendações quanto ao teor de umidade/grau de compactação, CRATerre (1979) classificou o solo segundo a sua massa específica seca após o ensaio de Proctor, em quatro intervalos que vão do fraco ao excepcional (Tabela 2.8).

Tabela 2.8: Massa específica seca após compactação

Massa específica seca (kg/m ³)	Classificação
1650-1760	Fraco
1760-2100	Muito satisfatório
2100-2200	Excelente
2200-2400	Excepcional

Fonte: Adaptado de CRATerre (1979).

2.1.5 Estabilização do solo

Por vezes, a mescla de solos não é suficiente para atingir os parâmetros necessários à construção de edificações com terra. À inclusão de outros materiais ou alterações no solo dá-se o nome de estabilização, que se refere a todo processo no qual o solo melhora suas características e permite que as propriedades finais sejam as necessárias ao devido uso ou técnica escolhida.

Apesar de ser uma prática milenar, somente em 1920, foi desenvolvida uma abordagem científica, com a combinação de diversas pesquisas da época e mais aprofundada a partir dos anos seguintes até hoje (Houben e Guillaud, 1989).

Segundo Rigassi e CRATerre (1985), apenas duas características da terra podem ser tratadas por meio da estabilização: a sua estrutura e a sua textura, através de três maneiras:

- reduzir o volume de espaços vazios entre partículas, afetando a porosidade;
- bloquear os vazios que não podem ser eliminados, selando-os, i.e., afetando sua permeabilidade;
- aumentar a força de ligação entre as partículas, especialmente nas ligações químicas dos argilo-minerais, i.e., afetando a resistência mecânica.

Houben e Guillaud (1995) classificam a estabilização em três processos:

- estabilização mecânica: a compactação da terra altera sua densidade, sua resistência e compressibilidade, além da permeabilidade e porosidade;
- estabilização física: as propriedades da terra podem ser modificadas alterando sua granulometria, com a adição de outro solo de características diferentes. Também pode ser estabilizado por tratamento térmico: desidratação ou congelamento; ou tratamento elétrico: eletro-osmose que promove a drenagem da terra, dando novas características estruturais;

- estabilização química: os materiais adicionados reagem com as partículas da terra que modificam as propriedades da mistura. Estes formam uma matriz que liga ou engloba as partículas reagindo principalmente com os argilo-minerais que a constituem.

Já Neves *et al* (2009) classificam a estabilização em quatro categorias diferentes:

- estabilização por cimentação: o processo objetiva solidificar as partículas do solo (areia, silte e argila), dificultando a absorção da água pela argila; utiliza-se principalmente estabilizantes como cal (virgem ou hidratada) e cimento Portland;
- estabilização por armação: a utilização de fibras (vegetais ou artificiais), por exemplo, permite assegurar, por fricção com as partículas de argila, maior estabilidade e durabilidade ao material. Por outro lado, a resistência mecânica diminui;
- estabilização por impermeabilização: o processo milenar de adição de betume torna as partículas de argila estáveis e mais resistentes à ação da água. Outros óleos e azeites também podem ser utilizados para essa estabilização;
- estabilização por tratamento químico: além de agente cimentante, a cal funciona para a estabilização química, pois forma compostos estáveis com os argilo-minerais. Outras substâncias também podem ser utilizadas para esse processo, variando de acordo com a composição química da argila presente no solo.

Burroughs (2008) fez um estudo com 104 tipos de solos e com variações em quantidades de estabilizante, totalizando 219 amostras. Para esse estudo, foram utilizados o cimento Portland, a cal e o betume como agentes estabilizadores. Em função de resultados da resistência à compressão mínima exigida (2MPa), o autor relacionou o Índice de Plasticidade (obtido pelos índices de consistência) e a Retração Linear (obtida pelo ensaio normatizado pela Austrália sob o nome AS 1289.C4.1 – *Soil Survey Standard Test Method: Linear Shrinkage*) com a possibilidade de estabilização do solo. Ele desenvolveu uma metodologia para verificar a aptidão de um solo para ser estabilizado (Figura 2.8).

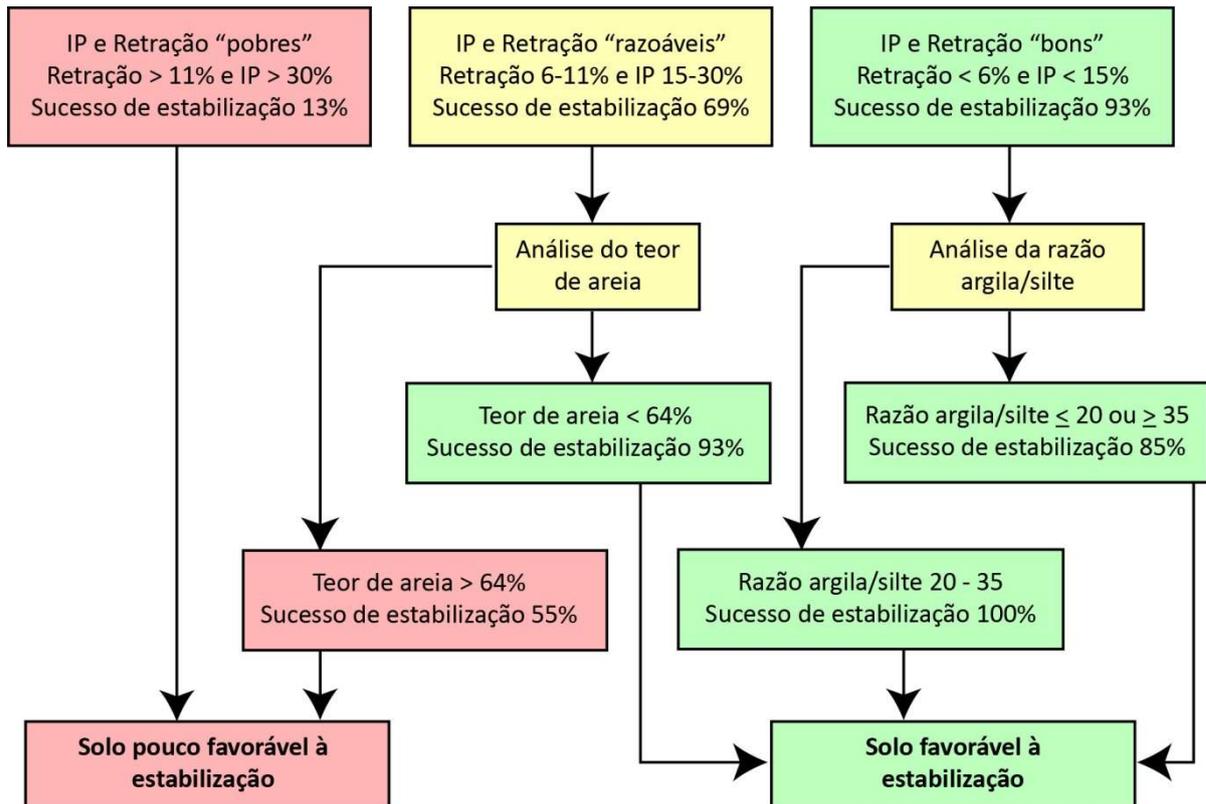


Figura 2.8 - Metodologia para verificar a aptidão de um solo para ser estabilizado, adaptado de Burroughs, 2008

2.1.5.1 Estabilização com cimento Portland

King (1996) faz uma analogia clara sobre a utilização de cimento Portland na estabilização de solos para uso das técnicas de compactação. Segundo ele, na geologia existe uma classe de rocha chamada conglomerado: uma mistura de areia e partículas de rochas depositadas juntas em algum tipo de ligante natural ou matriz cimentante. Este é exatamente o modelo de estabilização que a terra emula, uma parede de terra estabilizada é efetivamente uma parede-rocha construída artificialmente. A taipa de pilão ou blocos de terra comprimida podem emular um tipo particularmente atraente de conglomerado ou rocha sedimentar, formada quando as camadas de material de diferentes cores são depositadas sucessivamente.

Estabilização com adição de cimento Portland nas técnicas de compactação melhora as características do material, em particular, sua resistência mecânica à água, graças à ligação física que ela cria entre as partículas maiores da terra: as areias. Por isso, solos com teores de argila maiores do que 20% na granulometria não são recomendados para essa estabilização. Segundo Minke (2001), quanto maior a porcentagem de argila no solo, maior será a

quantidade necessária de cimento para produzir o mesmo efeito de estabilização. Testes apontam que, via de regra, solos menos argilosos apresentam melhores resultados de estabilização com cimento, enquanto os mais argilosos produzem respostas melhores com cal. O cimento é mais efetivo com as argilas Caolinita e a cal com as Esmectitas (Minke, 2001).

Assim como o concreto, tanto os blocos comprimidos como os painéis apilados, atingem a máxima resistência à água após 28 dias da moldagem quando estabilizados com cimento; a cura mínima deve ser de sete dias, protegidos do sol e do vento, além de mantê-los úmidos com molhagens periódicas.

Segundo Rigassi e CRATerre-EAG (1985), em geral, 5% a 6% de cimento é a quantidade necessária para obter resultados satisfatórios (em volume). A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) recomenda adição de 10% de volume de cimento no solo (traço 1:10) como parâmetro básico, podendo ser diminuída a quantidade de cimento para o caso de maior controle de qualidade na fabricação dos blocos ou dos painéis monolíticos (ABCP, 2000). Minke (2001) apresenta experimento com variação na quantidade de cimento para diferentes solos (argiloso, siltoso e arenoso) para a compressão de blocos (Figura 2.9):

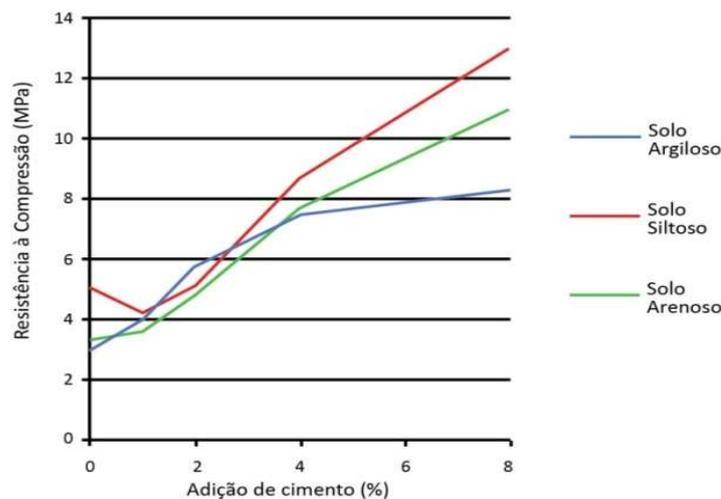


Figura 2.9 - Alteração na tensão ruptura à compressão de amostras de solos com adição de cimento Portland, adaptado de Minke, 2001.

2.1.5.2 Estabilização com cal

Solos com maior porcentagem de argila são mais indicados para a estabilização com cal. Isso porque os íons de cálcio da cal são trocados com os íons metálicos dos argilo-minerais

(Alumínio, Magnésio, Ferro e Zinco), resultando em fortes aglomerações das partículas finas e impedindo a penetração da água. (Minke, 2001).

Além disso, a cal reage com o CO₂ do ar para formar calcário. De acordo com Houben e Guillaud (1995), este é o mecanismo mais importante que influencia a estabilização da terra com cal. As propriedades de resistência do material resultam essencialmente da dissolução dos minerais argilosos em um meio alcalino produzido pela cal e pela recombinação do silício e silicatos de complexos de alumínio e de cálcio que solidificam os grãos entre eles. A cal deve ser acrescentada à terra em uma quantidade suficiente para produzir e manter um pH elevado, necessário para a dissolução dos minerais argilosos e durante um período suficiente para que ocorra uma reação de estabilização efetiva.

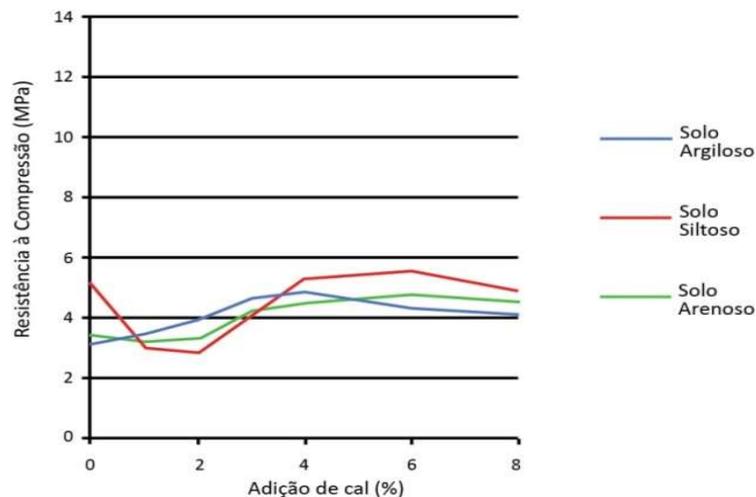


Figura 2.10 - Alteração na tensão ruptura à compressão de amostras de solos com adição de cal, adaptado de Minke, 2001.

2.2 TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO COM TERRA

As construções que utilizam terra como material foram edificadas em quase todas as civilizações passadas, estiveram e ainda estão em todos os continentes do planeta (Figura 2.11). Desde as primeiras civilizações, entre o Nilo, o Tigre e o Eufrates, a terra é, ainda hoje, um dos principais materiais de construção utilizados para edificar casas e edifícios, tanto na zona rural quanto nas cidades (Houben e Guillaud, 1995). Na América Latina, foram encontradas construções em adobe em quase todas as culturas pré-colombianas (Minke, 2001).

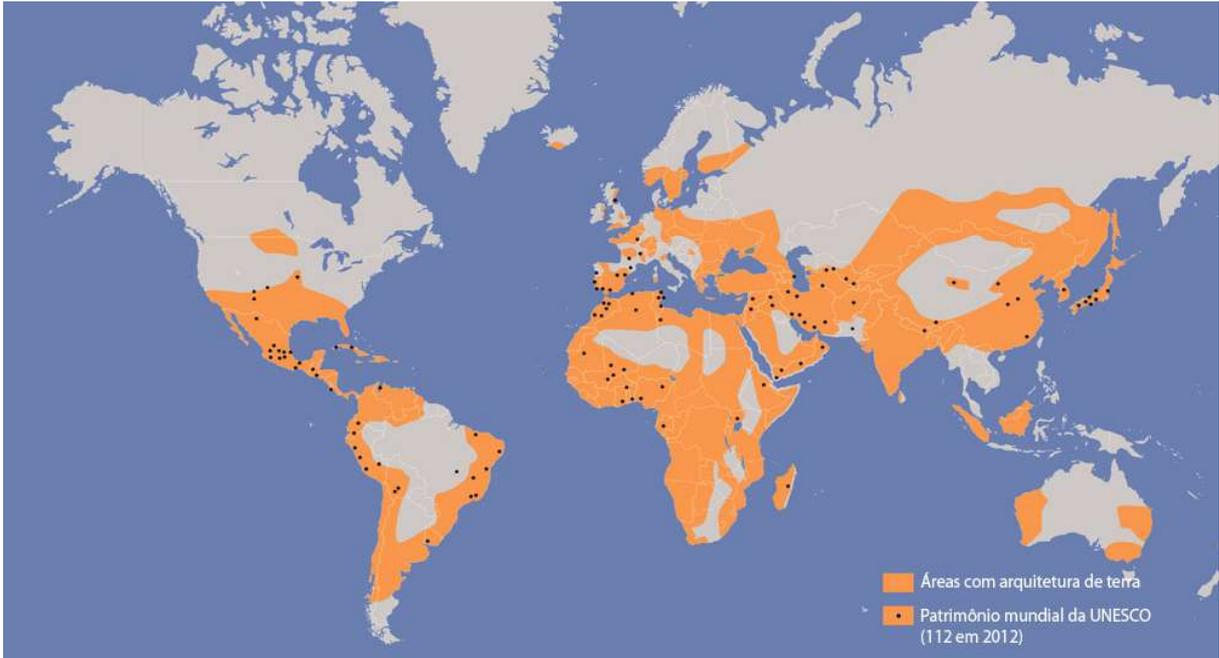


Figura 2.11 - Distribuição geográfica da arquitetura de terra, segundo *Auroville Earth Institute*, cadeira da UNESCO sobre arquitetura de terra. Fonte: site Earth-auroville



Figura 2.12 – Vista da cidade de Shibam, no Yemen. A cidade conhecida como "Manhattan do deserto" possui edifícios construídos em terra de até oito pavimentos datados do século XVI.

As técnicas de construção que utilizam a terra como matéria-prima foram transmitidas por meio do conhecimento popular e da tradição geração após geração. Houve também transferências de conhecimento com as invasões e colonizações, nas quais um povo entrava em contato com novas tecnologias ou diferentes formas de execução trazidas pelos estrangeiros, unindo o saber local com o novo conhecimento, e assim, gerando novas e variadas combinações entre elas (Neves e Faria, 2011).

O leque de possibilidades de técnicas e métodos construtivos em terra é amplo. Houben e Guillaud (1991) identificaram e sistematizaram 18 métodos fundamentais de construção com terra (antigos e modernos) que, misturados e/ou modificados, são capazes de uma grande variedade de maneiras e formas de utilização (

Figura 2.13).

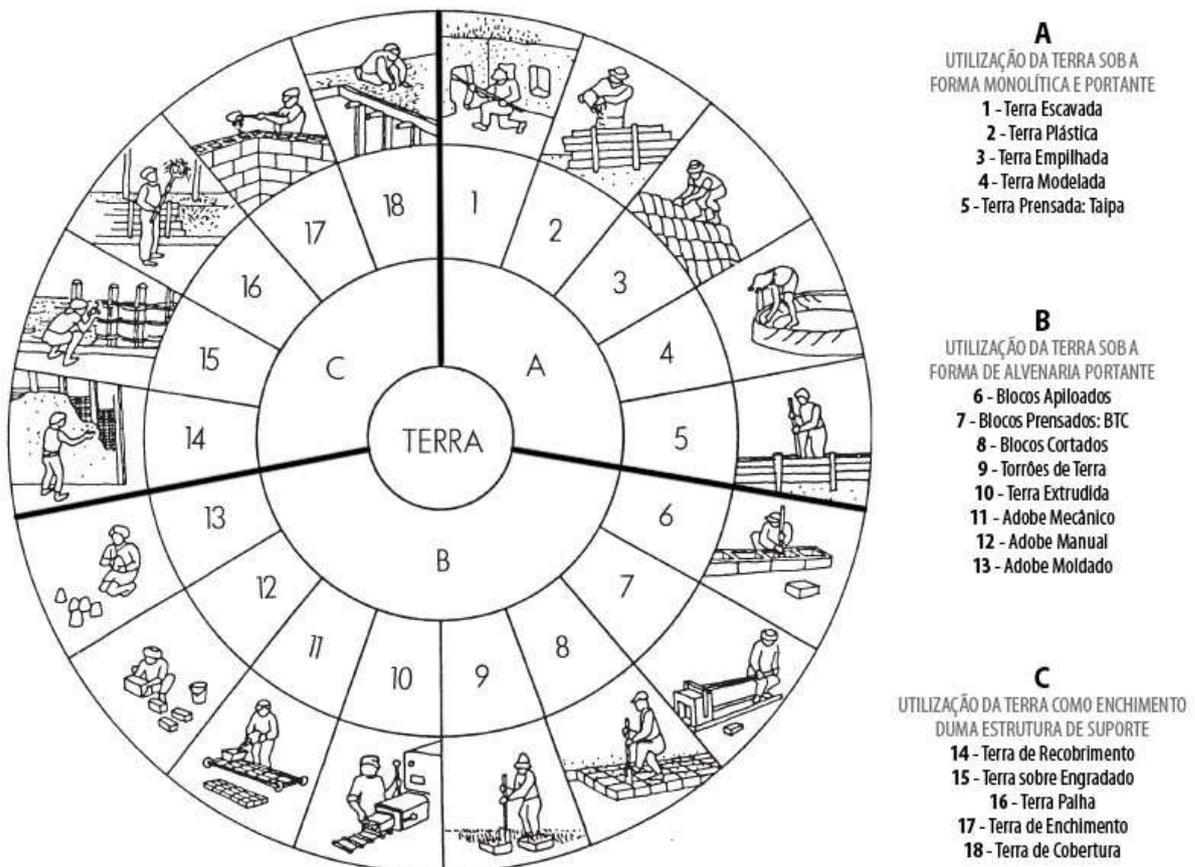


Figura 2.13 – Diagrama dos métodos fundamentais de construção com terra divididos em famílias, segundo Houben e Guillaud (1991), p. 163.

Esses métodos foram divididos em três famílias:

- Uso da terra na forma monolítica ou portante (família A): nesta família, constituída por cinco técnicas construtivas (terra escavada, terra plástica, terra empilhada ou COB, terra modelada e terra comprimida ou taipa de pilão), a edificação é elevada *in situ*, ou seja, “não existe separação entre o material e a técnica construtiva” (Fernandes, 2006, p. 20).

- Uso da terra na forma de alvenaria portante (família B): consiste na fabricação prévia de peças ou blocos em terra que serão utilizados na construção após secagem. Essa família compreende oito técnicas (blocos apilados, blocos comprimidos ou BTC, blocos cortados, torrões de terra, terra extrudida, adobe mecânico, adobe manual e adobe moldado).
- Uso da terra como enchimento de uma estrutura de suporte (família C): família que combina o uso da terra com estruturas de suporte como madeira, bambu e outros materiais. Nas cinco técnicas identificadas dessa família (terra de recobrimento ou pau-a-pique, terra sobre engradado, terra-palha ou *straw clay*, terra de enchimento e terra de cobertura), a terra é utilizada como enchimento ou revestimento da estrutura, de forma secundária (Fernandes, 2006).

O Apêndice A apresenta resumidamente as técnicas e métodos construtivos do diagrama das técnicas apresentadas por Houben e Guillard (1991) e que Silva (1995) e Fernandes (2006) analisaram; Silva, além de catalogar o grupo das técnicas classificadas pelos autores, apresenta diversos sistemas construtivos, dimensionamento básico das estruturas (e os esforços mecânicos submetidos) e revestimentos executados com terra.

Neves *et al* (2009) fazem uma classificação semelhante dos grupos de técnicas construtivas com terra: alvenaria, monolítico e técnicas mistas. Essa classificação não insere diversas técnicas citadas por Houben e Guillard (1991), mas descrevem as mais utilizadas atualmente no contexto latino-americano. No grupo alvenaria, estão as técnicas de blocos e tijolos, compactados ou prensados, como BTC e adobe; no grupo monolítico, as técnicas de taipa de pilão ou painéis de solo-cimento; em técnicas mistas agrupam-se as técnicas que usam uma estrutura portante (especialmente a madeira ou bambu) e a terra como preenchimento dos entramados.

Segundo Houben e Guillard (1995, p. 13), o grande potencial da terra permitiu a construção desde casas modestas, rurais e urbanas, até edifícios religiosos e palácios. “A terra é provavelmente um dos mais tradicionais materiais que oferece raras possibilidades equitativas de uso”. Algumas das técnicas tradicionais ainda são utilizadas em muitos países, outras foram abandonadas, outras ainda são objetos de experimentações recentes. Dentre as técnicas que permanecem muito tradicionais e são bastante utilizadas estão três: o pau-a-pique, a terra-palha ou *straw clay* e o cob. Já as técnicas de adobe, terra compactada ou taipa

de pilão e os blocos de terra comprimida tiveram grande evolução, ligada ao processo de modernização e utilização de máquinas para a produção e métodos de aplicação.

Uma outra classificação das 18 técnicas pode ser feita quando levamos em conta os sistemas construtivos: fundação, piso, parede, estrutura, cobertura e acabamento/revestimento (Tabela 2.9).

Tabela 2.9: Classificação das técnicas de construção com terra quanto ao sistema/elemento construtivo:

TÉCNICA	FUNDAÇÃO	PISO	PAREDE	ESTRUTURA	COBERT.	REVEST.	MANUAL	MECANIZADA
Terra Escavada	X	X	X	X	X		X	X
Terra Plástica		X	X			X	X	
COB			X				X	
Terra Modelada			X				X	
Taipa de Pilão	X		X	X			X	X
Blocos Apilados		X	X	X			X	
BTC		X	X	X	X	X	X	X
Blocos Cortados			X	X			X	
Torrões de Terra			X	X			X	
Terra Extrudada			X	X				X
Adobe mecânico			X	X	X			X
Adobe manual			X	X	X		X	
Adobe moldado			X	X	X		X	
Pau-a-pique			X				X	
Terra s/ engradado			X				X	
Straw clay			X			X	X	X
Terra enchimento			X	X			X	X
Terra de cobertura					X	X	X	

Dentre as técnicas de construção com terra apresentadas, foram escolhidas a Taipa de Pilão e o Bloco de Terra Comprimida para o aprofundamento do estudo, pois apresentam grande potencial de desenvolvimento tecnológico, industrialização e possuem menor resistência à inserção no mercado da construção.

2.2.1 Terra prensada ou taipa de pilão

A técnica de terra prensada é a mais conhecida da família que utiliza a terra de forma monolítica ou portante. Exemplares de edificações construídas com essa técnica são encontrados por todo o mundo e, por isso, ela possui diversas denominações: é chamada no Brasil e em Portugal de taipa de pilão ou simplesmente taipa; nos países de língua espanhola é chamada *tapial*; na França é denominada *pisé* ou *terre pisé* e nos países de língua inglesa, *rammed earth*.



Figura 2.14 - Residência em Piracicaba, SP, executada em taipa de pilão em 2014. Projeto do arquiteto Márcio V. Hoffman.

A técnica de taipa de pilão consiste, resumidamente, em apiloar camadas de terra entre formas, construindo assim paredes e muros de material incombustível, isotérmico natural e particularmente barato. As formas que sustentam o material durante o apiloamento são denominadas taipais. Podem ser adicionados à mistura a cal, cimento, palha, estrume de animais entre outros, caracterizando assim a estabilização do solo.

No Brasil, essa técnica foi utilizada no período colonial, trazida pelos mestres taipeiros portugueses. Segundo Pisani (2004), a seleção da terra era feita pelo próprio taipeiro que, de forma empírica, selecionava os solos e calculava as misturas necessárias para a execução das paredes. Os solos vermelhos, roxos e pardos eram os preferidos, nessa ordem, por possibilitarem maior "liga" ou trabalhabilidade. Toda a terra era "retirada do local próximo à construção devido às dificuldades de transporte e ao volume grande de material" (Pisani, 2004, p.10).



Figura 2.15 - Casa do Padre Inácio, construção bandeirista de 1753 na cidade de Cotia, São Paulo. Suas paredes "nascem" diretamente das fundações, também executadas com a técnica de taipa de pilão. Fonte: site Rota mogiana

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e a ABNT denominam "solo-cimento" qualquer técnica construtiva de compressão de solo estabilizado com cimento. Essa denominação veio de experiências desde 1930, quando o solo-cimento começou a ser utilizado no Brasil como base de pavimentação de estradas. Em 1944, foi realizada a construção da primeira edificação em painéis monolíticos de solo-cimento: uma estação de bombeamento no aeroporto de Santarém, no Pará (Laterman, 1975). Entre 1949 e 1950, o Serviço Nacional de Tuberculose construiu em Manaus o Hospital Adriano Jorge com 10.800m² de área, também em paredes monolíticas de solo-cimento, abrigando 432 leitos (Taveira, 1987).

2.2.1.1 Seleção e correção do solo

Não é qualquer tipo de terra que pode ser utilizado na construção de painéis monolíticos com a técnica de taipa de pilão. Faz-se necessário o conhecimento das principais características da jazida para a verificação de sua conformidade ou para sua correção, caso seja necessária. Conforme já visto, toda parcela orgânica do solo deverá ser descartada. As principais características para o uso da terra na taipa de pilão são: distribuição granulométrica, índice de plasticidade e curva de compactação. Essas características podem apontar as necessidades de correção granulométrica (conseguida ao adicionar outros tipos de terras), auxiliam na determinação do uso de um aglomerante apropriado (estabilização do solo) e determinam a umidade de compactação (Neves e Faria, 2011).

De maneira geral, as terras arenosas são mais indicadas, pois além de resultar em paredes mais resistentes e duráveis, são mais facilmente extraídas das jazidas. Além disso, a curva granulométrica deve ser bem distribuída (quantidade de partículas maiores e menores equilibrada) para obter maior massa específica da parede. A Figura 2.16 representa as recomendações dos autores Houben e Guillaud (1991) e do CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (1984, *apud* Neves *et al*, 2009) quanto aos teores de areia, silte e argila para a execução de paredes em taipa de pilão com solo estabilizado com cimento. A NBR 13553:2012, que "estabelece os requisitos para os materiais a serem empregados na construção de paredes monolíticas de solo-cimento sem função estrutural" (ABNT, 2012d, p.1), especifica a condição de teor de silte e argila entre 15 e 50%.

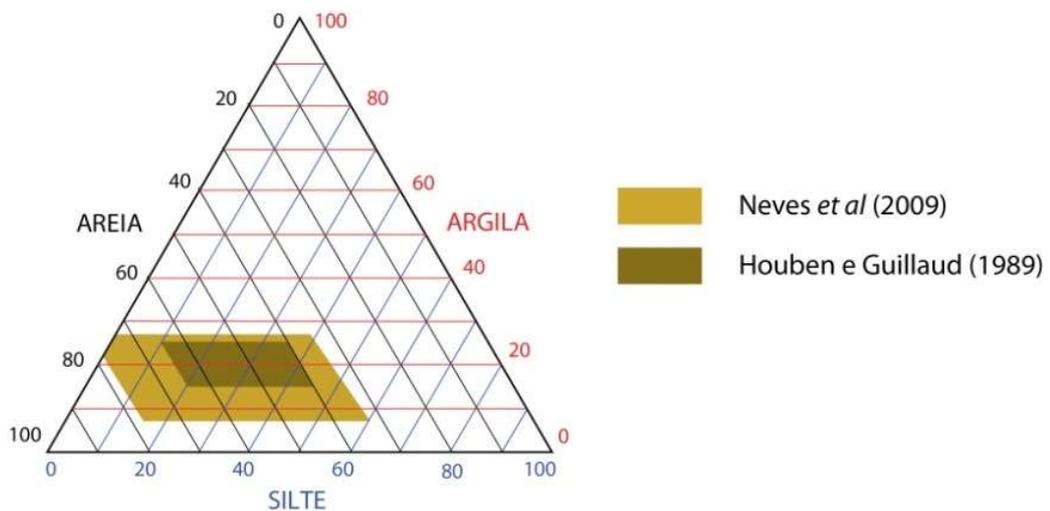


Figura 2.16 - Triângulo de Ferret com indicação dos teores de areia, silte e argila, indicados para a utilização do solo na construção de painéis monolíticos usando a técnica da taipa de pilão.

A plasticidade, característica indicada pelo Índice de Plasticidade, é influenciada pelo tipo de argila presente no solo. A retração quando seco e o inchamento do solo quando úmido serão tão maiores quanto maior for o Índice de Plasticidade. O CEPED (1984, *apud* Neves *et al*, 2009) e a NBR 13553:2012 (ABNT, 2012d) recomendam, para painéis monolíticos, índice de plasticidade inferior ou igual a 18% e limite de liquidez inferior ou igual a 45%.

O grau de compactação de uma terra está intrinsecamente ligado com sua resistência. A curva de compactação indica a quantidade ótima de água para lubrificar suas partículas e que levará à maior massa específica do material quando compactado. Assim, a terra apresenta menor porosidade, maior durabilidade e resistência mecânica quando utilizada na umidade ótima. A curva de compactação é alterada de acordo com a distribuição granulométrica e com

a plasticidade do solo; deverá ser aferida toda vez que houver mudança nesses fatores (Neves e Faria, 2011).

Para melhorar algumas características da taipa, é possível adicionar aglomerantes à mistura, estabilizando-a. Cimento e cal são os mais comuns e, como já visto, o cimento é utilizado em terras arenosas e a cal em terras mais argilosas. Segundo Neves e Faria (2011, p.53), "para se estabelecer a quantidade de aglomerante precisa-se conhecer, além do tipo da terra, o desenho da edificação". A Figura 2.17 relaciona o índice de plasticidade e a distribuição granulométrica do solo com o tipo de estabilizante mais recomendado.

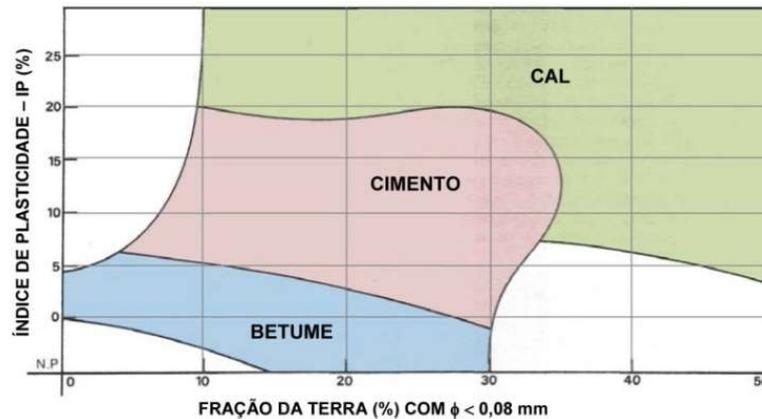


Figura 2.17 - Escolha do tipo de estabilizante em função do índice de plasticidade (IP) e da distribuição granulométrica da terra. Fonte: Neves *et al*, 2009.

2.2.1.2 Formas e equipamentos

Sendo a taipa de pilão uma técnica milenar difundida pelo mundo, diversos tipos de formas foram produzidos durante sua história. O projeto das formas deve levar em consideração a modulação exigida pelo projeto, a facilidade de montagem e desmontagem, além das suas dimensões e peso. A evolução dos sistemas de formas proporcionou maior produtividade em obra, uma vez que os processos de montagem e desmontagem são determinantes para o custo. Neves e Faria (2011) lembram que as formas representam um custo significativo nas obras em taipa de pilão, tanto pelo seu preço quanto pela eficiência da operação de montagem e desmontagem (hora/homem).

As formas mais utilizadas são as seguintes (Figura 2.18):

- Forma tipo "caixa", fechada em três ou quatro lados, permite a construção das paredes com sistema semelhante à alvenaria convencional. São construídos grandes

blocos repetidos numa mesma fiada até o fim do painel, sendo a camada superior compactada alternadamente a inferior. Esse tipo de forma não utiliza guias.

- Guias verticais fixas, embutidas na parede, podem ser de concreto, madeira ou metálicas e recebem as pranchas laterais. Assim como as formas tipo caixa, esse sistema executa todos os painéis do mesmo nível antes de iniciar o nível superior.
- Formas com guias verticais móveis executam painéis em toda sua altura; após esse painel concluído, as guias são relocadas para a execução do painel adjacente. Guias móveis geralmente são de madeira ou metálicas.



Forma tipo "caixa"



Guias Fixas



Guias Móveis

**Figura 2.18 - Sistemas utilizando forma tipo caixa, guias fixa (em concreto) e móvel (em madeira).
Fontes: site Recriar com você.**

O compactador (pilão) pode ser de madeira (manual) ou mecânico (Figura 2.19). Não há necessidade de ser muito pesado, uma vez que sua função é a de acomodar as partículas e eliminar ao máximo os vazios (ar) por meio da frequência das batidas e não do peso. Além da possibilidade de desmontar a forma, compactadores muito pesados levam o material a elevadas densidades, interferindo nas características físicas da taipa como a troca de umidade com o meio. Os compactadores manuais devem ter peso aproximado de 10kg e pilões de dimensões diferentes para cada etapa da compactação.

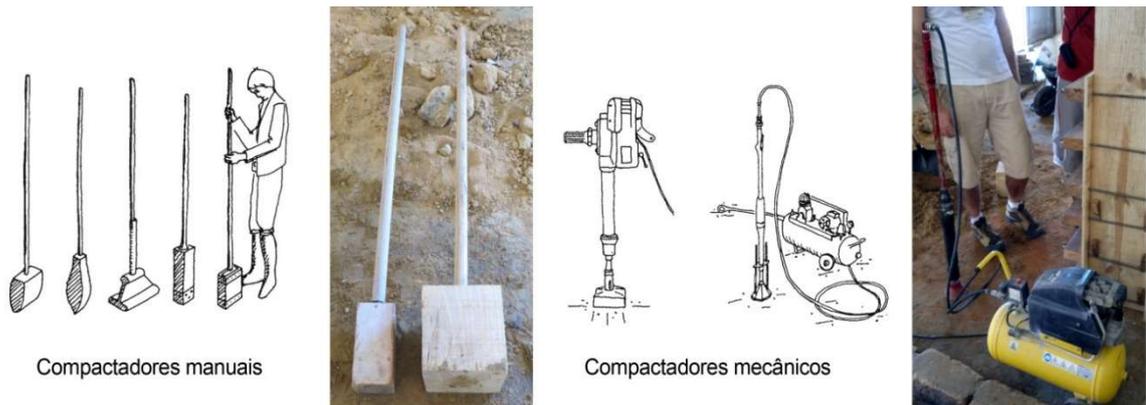


Figura 2.19 - Diversos compactadores utilizados para apiloar: manuais e mecânicos. Fonte: arquivo do autor; desenhos de Minke, 2001.

Sistemas de formas mais sofisticados, como as deslizantes, e a compactação mediante a utilização de pilões elétricos ou soquetes pneumáticos podem reduzir os custos de produção. Além de uma alternativa viável do ponto de vista ecológico, é também econômica.

2.2.1.3 Execução dos painéis

A primeira fase é a escolha da jazida, sua extração e o transporte para a obra. Lá, o solo deve ser destorroado, seco e peneirado. Quando necessário, deverá ser estabilizado com outra terra e/ou com a adição do aglomerante selecionado, e essa mistura deve ser homogeneizada ainda seca. Aos poucos, a água é adicionada até o ponto da umidade ótima para a compactação.

Com as guias e formas montadas e aprumadas, inicia-se o lançamento da terra em seu interior em uma camada de aproximadamente 20cm, nivelada em toda a sua extensão. A terra é compactada com os soquetes, de modo regular. A camada compactada fica com espessura aproximada de 13 ou 14cm. O prumo e o alinhamento da forma devem ser novamente verificados.

A forma pode ser desmontada e remontada logo que a compactação é finalizada. Recomenda-se a utilização de lubrificante na face da forma em contato com a terra, como óleos vegetais ou desmoldantes. A desmontagem deve ser cuidadosa para evitar danos à superfície da parede, e caso seja necessário corrigir algum reparo, deverá ser feita uma argamassa com o mesmo solo e o dobro do aglomerante utilizado e aplicado na hora, como recomenda Taveira (1987). A Figura 2.20 apresenta a sequência das atividades descritas.



Figura 2.20 - Atividades de montar e aprumar a forma, espalhar a terra, compactar e desmontar a forma. Fonte: Neves e Faria, 2011.

O processo de cura de paredes de taipa de pilão depende do tipo e da quantidade de aglomerantes utilizados na mistura e é importante, pois garante a umidade que as reações químicas necessitam (Heise, 2004). Segundo Neves e Faria (2011), quando a terra é estabilizada com cimento, a parede deve ser mantida úmida por pelo menos três dias, com umidificação três vezes ao dia; Taveira (1987) cita experiências bastante eficientes quando as molhagens diárias prosseguem por pelo menos 15 dias após a compactação. Já quando a terra é estabilizada com cal, a superfície da parede deve ficar livre de qualquer aplicação por ao menos 30 dias após sua compactação. Depois do processo de cura, rebocos, pinturas e hidrofugantes podem ser aplicados como acabamento.

Heise (2004) salienta que ao vigésimo oitavo dia, os painéis monolíticos de terra estabilizada com cimento atingem resistência à compressão simples da ordem de 3,5 a 7,0 MPa com a maioria dos solos e que esses valores praticamente dobram após decorrido um ano. “A estabilidade estrutural do solo-cimento é conseguida principalmente à custa da hidratação do cimento (...). A durabilidade é em função da ligação estabelecida entre as partículas do solo pela hidratação do cimento” (Heise, 2004, p.60).

2.2.1.4 Exigências técnicas da taipa e controles de qualidade

A seguir, algumas exigências e observações para a execução de paredes com a técnica da taipa de pilão, segundo Taveira (1987) e Minke (2001), Neves e Faria (2011):

- o desenho dos painéis deve ser feito de maneira que respeitem as características do material. A taipa de pilão possui elevada resistência à compressão, porém baixíssima resistência à tração e flexão;

- projetar a proteção contra a água, especificamente as chuvas e umidade do solo que penetra por capilaridade. Largos beirais, base impermeável ou revestida, aplicação de hidrofulgente nas paredes e execução de calçadas e drenos podem promover a proteção necessária e ampliar o ciclo de vida da edificação;
- a dimensão das formas deve ser compatível com o projeto e vice-versa. As formas devem respeitar a modulação do projeto com flexibilidade: o custo das formas, o desempenho e a produtividade da execução dos painéis têm valor significativo na obra;
- o módulo de elasticidade (E) das paredes tem valores de 5.000 ± 2.000 MPa e resistência à compressão de 3,5 a 7,0 MPa, desde que utilizados solos apropriados e executadas com controle rigoroso do processo de produção.

Heise (2004), em seu estudo sobre o processo e a qualidade da construção do painel monolítico de solo cimento, se propôs a calcular a produtividade e sugerir melhoramentos no controle do processo de produção na construção. O autor baseou suas conclusões no estudo de cinco obras nas quais ele participou. Dividindo o processo de edificação dos painéis em quatro etapas (preparação da mistura, preparação e montagem da forma, compactação e desforma e cura), Heise (2004) relata que 76% do tempo de produção são gastos com a “preparação da mistura” e “compactação” e que essas etapas devem ser mais otimizadas para um resultado de melhor qualidade arquitetônica, custo mais competitivo no mercado da construção civil e menor esforço dos operários envolvidos.

Dentre as recomendações, Heise (2004) cita:

- Canteiro de obra: o projeto do canteiro e o planejamento da produção podem eliminar transportes internos desnecessários, armazenamento e processamento do material em espaço inadequado e um local de trabalho mais seguro e adequado aos operários.
- Preparação da mistura: secagem e destorroamento da terra com utilização de equipamentos adequados; peneiramento mecânico e em local adequado para evitar desperdícios; mistura do material com equipamento mecânico (misturador planetário) que reduz o tempo da atividade, melhora a qualidade e o controle de umidade da mistura, diminui o desperdício e o esforço físico dos operários.

- Compactação: lançamento da mistura para dentro da forma com o desenvolvimento de ferramenta (algo como um funil) diminui o tempo da atividade e o desperdício do material; nivelamento da mistura “fofa” com ferramenta que possibilite maior controle da altura por toda a forma, melhorando o controle de qualidade e diminuindo o tempo de atividade; compactação com equipamento mecânico (compactador pneumático) que também melhora o controle de qualidade, aumenta a resistência mecânica do painel, diminui o tempo de atividade e o esforço do operário.
- Treinamento e qualificação da mão de obra: a produtividade, eficiência e qualidade da construção melhoram quanto mais treinados e experientes são os operários.

2.2.2 Blocos comprimidos ou BTC

Os Blocos de Terra Comprimida (BTC ou *CEB – compressed earth block*) ou blocos de solo-cimento são uma técnica contemporânea e de maior sucesso nos dias de hoje devido à facilidade de fabricação, secagem rápida e resistência mecânica. Consiste em comprimir ou prensar terra quase seca (umidade ótima), com ou sem aglomerante, numa prensa (manual ou mecânica) com molde, seguido do desmolde imediato. Esses blocos podem ser utilizados em qualquer tipo de construção, seja como simples vedação ou como alvenaria estrutural, e podem ser aparentes ou revestidos (Fernandes, 2006; Neves e Faria, 2011).

Os BTC, quando garantido o controle de qualidade, podem muito facilmente ser comparados com outros materiais, como o bloco de cimento e areia ou o tijolo queimado. Daí a maior aceitação entre os tomadores de decisão, construtores e usuários finais (Guillaud *et al*, 1995).



Figura 2.21 - Residência em Jambeiro (SP), projeto do arquiteto Ricardo Piva, executado com blocos de terra comprimida / solo-cimento. Fonte: arquivo Ricardo Piva.

A ideia de comprimir os blocos de terra é relativamente recente. A intenção era melhorar a qualidade e o desempenho dos adobes. Segundo Guillaud *et al* (1995, p.10), as primeiras máquinas para compactar terra foram desenvolvidas na França do século XVIII. François Cointeraux, "inventor e fervoroso defensor da *nouveau pisé* projetou o *crecise*, um dispositivo derivado de um lagar [dispositivo usado para espremer frutos]". No início do século XX, foram projetadas as primeiras prensas mecânicas, utilizando pesadas tampas que eram forçadas para baixo em moldes, e até a indústria de tijolos queimados passou a utilizar prensas nas quais a terra era comprimida entre duas placas convergentes.

Em 1952, o engenheiro colombiano Raul Ramires projetou a famosa prensa CINVA-RAM (Figura 2.22), que se popularizou e se espalhou pelo mundo. Nas décadas de 70 e 80 do século passado, apareceu uma nova geração de prensas manuais mecânicas e motorizadas, levando ao surgimento, hoje, de um verdadeiro mercado para a produção e aplicação do bloco de terra comprimida.



Figura 2.22 - Prensa manual CINVA-RAM. Fonte: site Cedric-alby

2.2.2.1 Seleção e correção do solo

Assim como a taipa de pilão, o bloco de terra comprimida exige solos com boa quantidade de areia, pois é a responsável pela estruturação (resistência à compressão), e certa quantidade de argila, responsável pela coesão e aglutinação das partículas. Por vezes, é necessário estabilizar a terra para a produção do BTC, sendo a estabilização granular - adição de outro tipo de solo - ou química - adição de aglomerantes (Neves e Faria, 2011).

De maneira geral, as terras com maior proporção de areia são as mais indicadas e com a curva granulométrica bem distribuída (areias grossa, média e fina em quantidades equilibradas). Guillaud *et al* (1995) sugerem teores de areia entre 25% e 80%, silte entre 10% e 25% e argila entre 8% e 30%; Neves e Faria (2011) sugerem 50% a 95% de areia. A NBR 10833:2012 (ABNT, 2012b) especifica a condição de teor de silte e argila entre 10% a 50%. Em todas as recomendações, foi observado que todo o material deverá passar pela peneira de 4,8mm.

Outros parâmetros também são observados. Neves e Faria (2011) e a NBR 10833:2012 (ABNT, 2012b) indicam que o solo deve ter limite de liquidez inferior ou igual a 45% e índice de plasticidade inferior ou igual a 18%. A umidade ótima pode ser determinada com razoável precisão através do teste descrito por Neves e Faria:

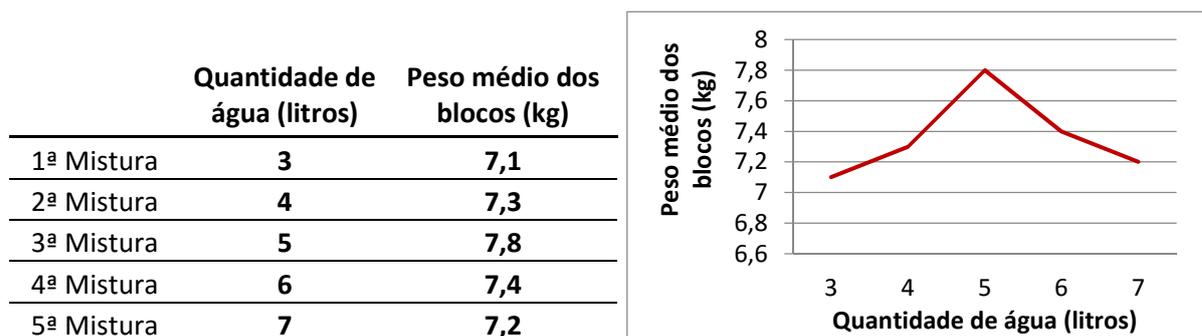
colocar uma porção da mistura na palma da mão e comprimi-la com os dedos; ao abrir a mão, o bolo formado deve guardar o sinal dos dedos; ao

deixar cair o bolo da altura de 1,0 m, ele deve se espatifar; caso não se consiga formar o bolo com a marca dos dedos na mão, a umidade é insuficiente; caso o bolo, ao cair, mantenha-se coeso, a umidade é excessiva.

(Neves e Faria, 2011, p.37)

Rigassi e CRATerre (1985) indicam outro teste para atingir a umidade ótima, similar ao Ensaio de Proctor. Deve-se tomar uma mesma quantidade (em massa) de solo seco, ao menos cinco vezes, e umedecê-los com quantidades diferentes de água. Prensar cada mistura em pelo menos 10 BTC e pesar cada bloco. O peso médio dos blocos deve ser anotado para cada quantidade de água. O objetivo do teste é encontrar a quantidade de água que permite a densidade mais elevada, ou seja, o bloco mais pesado (Tabela 2.10).

Tabela 2.10 – Exemplo de teste para verificação da umidade ótima através da densidade mais elevada. No exemplo, a quantidade ótima de água é 5 litros para uma amostra de 60 litros de solo.



Fonte: adaptado de Rigassi e CRATerre (1985).

Para a estabilização química da terra, normalmente é utilizado o cimento Portland. As normas brasileiras não mencionam outro tipo de aglomerante, ainda que seja possível fazer a estabilização com cal, betume e até produtos de origem vegetal. Para a determinação do teor mais adequado de cimento a ser adicionado na terra, Neves e Faria (2011) sugerem a fabricação de 20 BTC com três diferentes composições de terra e cimento, que serão submetidos a ensaios laboratoriais de resistência à compressão e absorção de água. As NBR 8491:2012 (tijolos) e 10834:2012 (blocos) determinam condições específicas para os BTC, sendo a resistência à compressão maior ou igual a 2,0 MPa (20 kgf/cm²) e absorção de água inferior ou igual a 20% (ABNT, 2012a e 2012c). O teor de cimento a ser adotado será encontrado através da interpolação dos resultados dos ensaios (Figura 2.23).

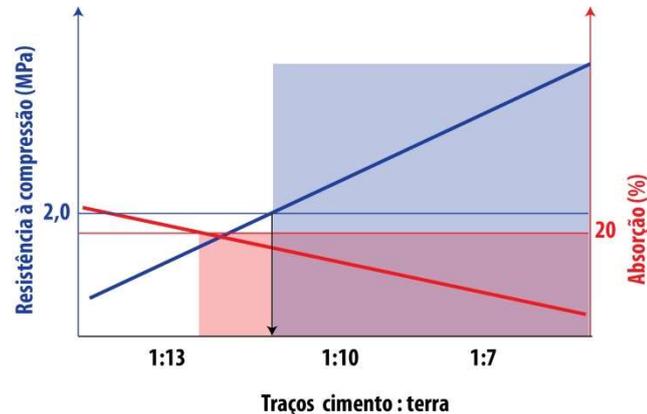


Figura 2.23 - Exemplo de interpolação de resultados para definir a dosagem de cimento no BTC, nas proporções de cimento e terra de 1:7, 1:10 e 1:13. Fonte: Neves e Faria, 2011.

2.2.2.2 Blocos e prensas

O BTC é moldado e prensado em equipamentos cujos moldes podem ser de formatos e tamanhos diferentes. Os blocos podem ser maciços com superfície lisa ou com encaixe e furados, também com ou sem encaixe (Figura 2.24). O maquinário deve permitir a fabricação de meio bloco e bloco tipo canaleta. Segundo Neves e Faria (2011), as dimensões mais comuns do BTC são 20x9,5x5cm e 23x11x5cm, para blocos maciços e furados (prensagem em um só sentido) e 39x9x14cm, 39x14x14cm e 39x19x14cm para blocos furados (prensagem em duplo sentido). Os furos variam de 5 a 8cm de diâmetro.



Figura 2.24 – Exemplos de BTC: furado com encaixe e maciço com reentrância. Fonte: arquivo do autor.

O maquinário deve ser dimensionado visando atender às necessidades de produção, custo e do porte da edificação. Existem no mercado desde prensas manuais simples até equipamentos mecânicos e hidráulicos que englobam todas as etapas de execução do BTC,

como peneirador, misturador, dosador e triturador, além da prensa. As prensas manuais executam somente a prensagem em um sentido, enquanto as motorizadas podem prensar em duplo sentido (Figura 2.25).



Figura 2.25 – Exemplos de prensas: duas manuais (esquerda) e duas hidráulicas (direita). Fonte: catálogo das empresas Sahara e Ecomáquinas.

Ferraz Jr., citado por Neves e Faria (2011) apresenta, na Tabela 2.11, a produtividade e energia de compactação de algumas prensas:

Tabela 2.11 - Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado

Tipo de prensa		Energia de compactação (MPa)	Taxa de compactação do solo	Produção (BTC/dia)
Manual	Mecânica	1,5 – 2,0	1,38	300 a 1200
	Hidráulica	2,0 – 10,0	1,65	2000 a 2800
Motorizada	Mecânica	4,0 – 24,0	> 1,65	1600 a 12000
	Hidráulica	>20,0	> 2,00	2000 a 4000

Fonte: Ferraz Jr., citado por Neves e Faria (2011)

2.2.2.3 Moldagem do BTC e execução da alvenaria

Verificado o tipo e a quantidade de estabilizante usado (granular e/ou química) e a umidade ótima, faz-se a mistura das partes secas peneiradas e depois junta-se a água. Coloca-se a mistura no equipamento e procede-se a prensagem e extração do BTC (Figura 2.26). Os blocos devem ser acomodados em uma superfície lisa e plana, protegidos das intempéries. A cura segue os mesmos procedimentos da taipa de pilão: molhagens sucessivas durante os sete primeiros dias, mantendo os BTC cobertos e úmidos para conferir maior resistência (período de cura). Após esse período, eles podem ser acomodados em pilhas de até 1,5 metros de altura ainda cobertos com lona plástica para manter a umidade.



Figura 2.26 – Processo de moldagem do BTC. Fonte: Neves e Faria, 2011.

A execução da alvenaria com os BTC é semelhante à alvenaria convencional: blocos assentados com argamassa na forma de “amarração”. A argamassa utilizada pode ser constituída de cimento, cal, areia e terra, na textura plástica usual ou fluida – nesse caso, deve ser utilizada bisnaga com cola PVA e a aplicação será ao redor dos furos ou encaixes. Guillaud *et al* (1995) orientam que, quando utilizado BTC estabilizado, a argamassa sempre deverá conter o estabilizante, com adição do cimento ou cal de 1,5 a 2 vezes maior que a massa do bloco. Ainda segundo os autores, como a secagem argamassa de assentamento é rápida, pode haver retração da parede. Esse problema é evitado com camadas de argamassa finas (Guillaud *et al*, 1995, p.26)

Os BTC são elementos de alvenaria estrutural e, com as exigências de carga da edificação, podem ser assentados de diversas maneiras, aumentando assim a resistência da parede. Quando utilizado BTC com furos, deve-se também colocar barras de ferro na vertical e encher o furo com argamassa ou graute nos cantos, encontros de parede e a cada 2 metros de comprimento (Figura 2.27 e Figura 2.28). Além das barras, devem ser colocados grampos (barras dobradas) a cada 50cm de elevação da parede nos encontros dessas.

Blocos tipo “canaleta” (com rebaixo no eixo longitudinal) são utilizados para execução de vergas, contra-vergas e cintas. O rebaixo é preenchido com argamassa ou graute e barras

de ferro e devem ultrapassar o vão. Esses blocos também servem para a passagem das instalações hidráulicas e elétricas (horizontal) em conjunto com os furos (vertical).

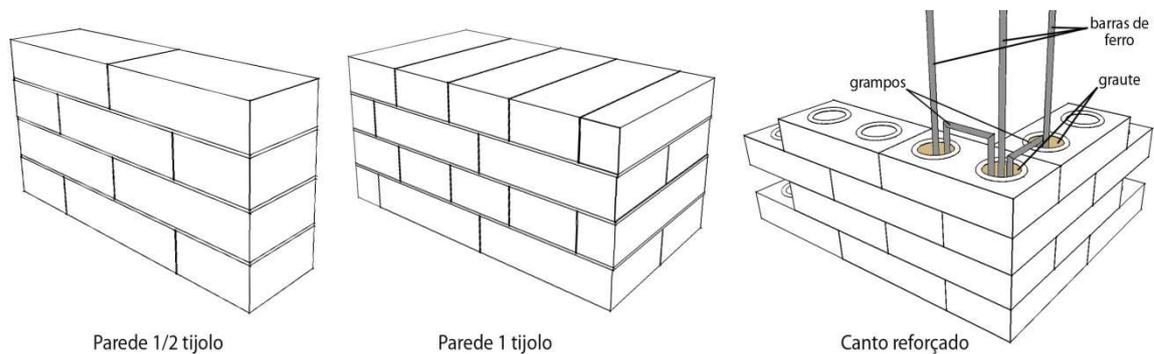


Figura 2.27 - Exemplos de tipos de amarração dos BTC e reforço no canto.



Figura 2.28 – Construção de alvenarias de BTC com furos. Enchimento dos furos com a barra de aço e micro concreto. A imagem mostra também as instalações passando pelos furos. Projeto do arquiteto Ricardo Piva. Fonte: Arquivo Ricardo Piva.

2.2.2.4 Controle de qualidade dos BTC

Rigassi e CRATerre (1985), autores de um manual de produção dos BTC, sugerem diversas formas de controle de qualidade na sua fabricação. Segundo os autores, objetivo dos controles de produção é verificar se o resultado final é correto em comparação com os níveis definidos durante a fase de projeto e de fabricação. Alguns processos de controle já foram

citados, como a seleção da terra, estabilizações (granulométrica e/ou química) e cura dos blocos. Adicionalmente, os autores descrevem outros processos:

- Controle da matéria prima: presença de sais na água deve ser evitada, principalmente quando os blocos são estabilizados com cimento ou cal. Verificar se o cimento recebido não começou a reagir com a umidade, conferindo seu peneiramento numa malha de 1mm a existência de pequenas bolas que não podem ser esmagadas com a ponta dos dedos. Em caso de início da reação, recusar o cimento. Estoque de materiais deve ser protegidos das intempéries.
- Mistura: quantificar e controlar diariamente a produção, com tolerância de 5%, do número de blocos por mistura, número de misturas feitas por saco de cimento, número de blocos por saco de cimento. Verificar visualmente se a mistura seca está homogênea para acrescentar água e verificar se a mistura com água está homogênea e com a quantidade correta antes de compactar. Dimensionar a quantidade da mistura a ser comprimida para não exceder o tempo de início da “pega” do cimento.
- Moldagem: verificar, por amostragem, se os blocos estão sendo moldados com as mesmas dimensões, peso e aparência, além de separar blocos de diversas misturas para os ensaios de resistência e absorção. Verificar a umidade dos blocos já comprimidos e em processo de cura, evitando que fiquem secos.
- Controle organizacional: criar fichas para os equipamentos com informações sobre manutenções necessárias (data e o que será feito na próxima manutenção); quadro com o controle da produção preenchido pelos operários e supervisores.
- Obra: verificar se os projetos e materiais de instalações hidráulica, elétrica e outros estão no local e se estão sendo executados em conjunto com a alvenaria. Dessa forma evitam-se cortes nas paredes para as instalações, o que diminuiria sua resistência.

3 TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO COM TERRA

A construção com terra utiliza, atualmente, técnicas de produção que vão desde as mais rudimentares e artesanais até os mais sofisticados processos de industrialização, mecanizados ou automatizados, e pode ser comparada com qualquer outra tecnologia de construção. Os sistemas construtivos mais primitivos continuam sendo utilizados por algumas populações mais carentes - econômica e tecnologicamente; por outro lado, incentivos a instituições de pesquisa e empresas especializadas nesse tipo de construção promovem o desenvolvimento de técnicas inovadoras e coerentes, que primam pela qualidade, simplicidade, eficiência e economia na construção (UNHABITAT, 1992; Neves, 1995; Heise, 2004).

As inovações técnicas e o desenvolvimento tecnológico da arquitetura e construção com terra necessitam, por um lado, referenciar-se na arquitetura vernácula e tradicional e, por outro, buscar, pesquisar e aprimorar as novas formas de execução e assim, equiparar sua eficiência aos sistemas construtivos atuais do mercado. Compreender as técnicas e processos construtivos dos antepassados e sua evolução tecnológica histórica são caminhos para a inovação. Ou seja, partir do saber histórico existente e avançar construindo novos saberes.

A passagem do processo de construção artesanal para a produção industrial deve ser justificada pelos parâmetros que regem cada caso particular, como as necessidades da sociedade, as bases técnicas e científicas existentes, as políticas de desenvolvimento, as considerações socioeconômicas e culturais, investimentos, procedimentos de trabalho etc. (UNHABITAT, 1992; Vargas, 2003).

Tecnologia, segundo Abiko (1980, p.15), é "um conjunto ordenado de conhecimentos empregados na produção e comercialização de bens e serviços"; Vargas (2003, p.182) sugere que tecnologia é a "utilização de conhecimentos científicos para satisfação das autênticas necessidades materiais de um povo". Este autor afirma que a pesquisa tecnológica, com metodologia muito semelhante à da pesquisa científica, deve procurar soluções para problemas práticos levando-se em conta as implicações socioeconômicas. Dethier (1986) deixa claro a importância da investigação tecnológica:

A nova evolução tecnológica não poderia constituir um objetivo: só pode ser um meio. Se o objetivo é o crescimento econômico, simples medida de produção utilizará as novas tecnologias para reproduzir a antiga ordem, acentuando as distorções; se o objetivo é o desenvolvimento da sociedade, empreenderá uma tarefa bem mais complexa procurando nas novas tecnologias, meios mais eficazes para melhor organizar e dominar o seu universo. Nenhum profissional especializado em qualquer das tecnologias resolverá o debate, porque é político e cultural, não conseguirá mobilizar as energias e os recursos necessários, se a sua única preocupação é fazer face à concorrência, imitá-la na conquista das tecnologias de ponta. (Dethier, 1986).

Atualmente, na sociedade ocidental, tecnologia tornou-se um meio para satisfazer demandas práticas, preocupando em usar as "coisas" como meros utensílios. O anseio dessa sociedade é a busca de tecnologias que possibilitem maior praticidade e velocidade à vida cotidiana. Quando não obtidas, tornam-se "um novo elemento passível de suscitar irritação e descontentamento" (LIPOVETSKY, 2007, p.26).

Com o mundo globalizado, países mais desenvolvidos vendem tecnologia aos menos desenvolvidos, sem considerar o atendimento às suas reais necessidades e se haverá conhecimento básico que assegure o entendimento. Como consequência, esta população torna-se simples usuária e consumidora, submissa aos princípios da técnica (Vargas, 2003; Norberg-Schulz, 2008). É fundamental para essa população que as soluções sejam apropriadas e apropriáveis. Nas palavras de Toca (*apud* Morales e Becerril, 2009, tradução nossa): "apropriadas à região, aos recursos e aos materiais disponíveis, e ao meio ambiente no qual se pretende inseri-las; e apropriáveis, para que os usuários as possam aprender e reproduzir."

A tecnologia apropriada, termo que surgiu na década de 1960, contribui concretamente para a transformação técnica, social e econômica da sociedade, visando o aumento do bem-estar ao maior número de pessoas e respeitando os parâmetros específicos de cada região e/ou população. Admite que diferentes culturas e regiões terão diferentes tecnologias apropriadas às suas características e confirma que o "auto desenvolvimento" dessa tecnologia é essencial para a formação da identidade cultural e independência política (Abiko, 1980).

A tecnologia apropriada obedece à um ciclo formado por quatro etapas (Figura 3.1), sendo elas:

- Criação da tecnologia: desenvolvimento da teoria e experimentação em protótipos.
- Transferência da tecnologia: guias e manuais de linguagem simples para atingir a maior parcela de pessoas.
- Avaliação da tecnologia: pelos usuários e criadores da tecnologia.
- Modificação da tecnologia: conforme o resultado da avaliação, modificações são feitas e o ciclo recomeça.

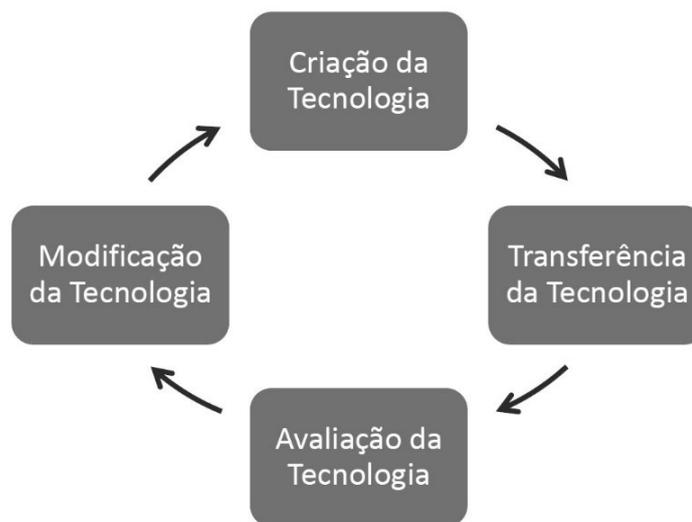


Figura 3.1 - Etapas da tecnologia apropriada, adaptado de Abiko, 1980.

O processo construtivo que utiliza a tecnologia apropriada não importa sistemas de construção e nem busca o retorno das técnicas arcaicas e ultrapassadas. Nesse sentido ele deve ser, segundo Abiko (1980) e Heise (2004):

- Capaz de atender aos requisitos técnicos:
 - usando recursos locais, como materiais e energia, minimizando a importação;
 - assegurando a aceitação do produto e o aumento da produtividade, quantitativa e qualitativamente;
 - garantindo a distribuição fácil, segura e regular;
 - proporcionando melhores ferramentas e equipamentos principalmente aos mais carentes no processo de crescimento urbano industrial.
- Capaz de atender às necessidades sociais:
 - usando as técnicas que possam ser adaptadas facilmente;

- resultando em maior utilização de mão-de-obra ociosa e subempregada;
- minimizando os choques sociais e culturais, graças ao gradual crescimento da produção e da produtividade.
- Capaz de satisfazer as necessidades econômicas:
 - minimizando o investimento, especialmente o estrangeiro, com o uso mais eficiente tanto de capital quanto de outros recursos;
 - assegurando que o aumento da produtividade resulte também em mercados mais amplos e estáveis e numa renda mais elevada para todos os produtores.

Na Ibero-América, a tecnologia da arquitetura e construção com terra inova especialmente no “aperfeiçoamento de componentes da alvenaria (...) e no desenvolvimento de sistemas de painéis monolíticos” (Neves, 1995, p.59). A autora elenca os principais temas de desenvolvimento, que serão tomados como referência para a pesquisa que segue:

- estudos sobre estabilização, impermeabilização e dosagens;
- desenvolvimento de métodos de controle de fabricação/execução visando a garantia da qualidade dos produtos;
- sistematização do processo construtivo visando aumentar a produtividade e diminuir o esforço físico no ato de construir;
- elaboração de recomendações técnicas e projetos adequados às condições ambientais da região e tradição cultural.

Os estudos apresentados a seguir são contextualizados na Ibero-América nos últimos 15 anos.

3.1 ESTUDOS SOBRE ESTABILIZAÇÃO, IMPERMEABILIZAÇÃO E DOSAGENS

Os estudos realizados sobre a estabilização da terra para execução de BTC e de painéis monolíticos têm três principais objetivos: melhorar as características físico-mecânicas, diminuir o descarte de resíduos no meio ambiente incluindo-os na mistura para a fabricação de blocos ou painéis e/ou diminuir a quantidade de cimento e cal utilizada na estabilização, diminuindo assim o impacto ambiental causado pela produção desses aglomerantes, mantendo as propriedades físico-mecânicas dos elementos.

Faria, Battistelle e Neves (2012) apresentaram metodologia científica para avaliar as características físicas e mecânicas de solo-cimento compactado e estabilizado com os mais

diversos materiais. Os autores exemplificam o método, avaliando a influência da adição do aditivo sintético DS-328, chamado de “baba-de-cupim”, e a diminuição do uso do cimento como estabilizante da mistura. Verificou-se melhora na resistência à compressão e diminuição da absorção da água nos corpos de prova com aditivo em comparação aos sem aditivo; com a terra utilizada no experimento (predominantemente arenoso: 77% de areia), verificou-se que, com apenas 2% de cimento Portland e o aditivo DS328, os corpos de prova atingiram resistência à compressão de 2,0MPa e absorção de água de 11%, ambos aos sete dias, o que respeita os requisitos mínimos exigidos pelas NBR 8491:2012e NBR 10834:2012 (ABNT, 2012a e 2012c).

Milani e Silva (2012), com o intuito buscar uma alternativa eficaz para a destinação do resíduo da lavagem da extração do minério de ferro na região pantaneira, conhecido como lama de minério de ferro, executaram ensaios misturando-a com cimento Portland e terra na fabricação de corpos de prova de solo-cimento, para avaliar suas propriedades. Feitas as dosagens diferenciadas (substituição da terra pelo resíduo de minério de ferro em porcentagens de 10%, 20% e 30%; cimento nas porcentagens de 6% e 10% em massa) e os exemplares referência (sem lama de minério), verificou-se que o traço com 20% de lama e 10% de cimento apresentou bons resultados (resistência média à compressão simples de 2,04MPa aos sete dias e 5,52MPa aos 90 dias; 16,38% de absorção de água aos 90 dias), melhores até que o traço referência com 10% de cimento (resistência média à compressão simples de 1,91MPa aos sete dias e 3,65MPa aos 90 dias; 16,75% de absorção de água aos 90 dias).

Seguindo a mesma metodologia, Milani, Castro e Bertocini (2012) utilizaram o resíduo da produção de agregados de pedreiras, chamado de pó de pedra, fino de basalto ou filer basáltico, na mistura de solo-cimento para verificar as propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova e BTC. A terra foi extraída de uma jazida em Campo Grande (MS), classificada como solo arenoso (82% de areia, 18% de silte e 0% de argila) e o fino de basalto com granulometria 30% de silte, 68% de areia e 2% de argila. A terra foi substituída por finos de basalto em proporções de 35%, 50% e 65%. Verificou-se que a mistura solo-fino de basalto-cimento com 50% de substituição de terra por fino de basalto e 10% de cimento apresentou o melhor desempenho comparado com as outras misturas (resistência média à compressão de 3,12MPa aos sete dias e 4,33MPa aos 28 dias; 10,63% de absorção de água aos sete dias).

A substituição de parte do cimento Portland utilizado para a estabilização do solo por cinza de carvão mineral proveniente da usina termoeletrica de Pecém, em Fortaleza (CE) foi o estudo apresentado por Soares, Bertini e Tavares Jr. (2012). O traço referência do solo-cimento foi de 1:10, em massa, e as misturas propostas seguiram as proporções de 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 15% de cinza em substituição ao cimento. Os resultados se apresentaram satisfatórios para as substituições de cinza por cimento nas proporções de 2,5% a 10%, ficando dentro das normas quanto à resistência à compressão e absorção de água, mesmo tendo sido ensaiados aos três dias de idade (as NBR 8491 e NBR 10834 requerem idade mínima de sete dias).

Jiménez (2010) apresenta estudo de BTC com a adição de “baba ou suco de cacto”, do cacto palma e da babosa (*Opuntia ficus-indica* e *opuntia rastrera* - palma e *Aloe vera barbadenses* - babosa) em diversas concentrações. O líquido viscoso é obtido a partir de uma mistura das folhas maduras dos cactos macerados e deixados em água (mucilagem). Após cinco dias, a mistura foi decantada e descartada a parte sólida. Esse líquido foi substituído pela água na mistura dos blocos de solo-cimento em diversas concentrações. Foram feitos os ensaios de compressão, absorção de água e testes químicos, por se tratar de matéria orgânica. Segundo os ensaios e referenciando nas normas mexicanas, os exemplares que tiveram melhores resultados foram os grupos de 40% de mucilagem de palma e de 4% de babosa, tendo melhor comportamento de resistência à compressão e absorção de água o de 40% de mucilagem de palma.

Buson, Varum e Sposto (2010) desenvolveram estudo de estabilização de BTC com fibras celulósicas longas oriundas dos sacos kraft de cimento reciclados, que passaram por um processo de limpeza, imersão em água, agitação, centrifugação e dispersão das fibras secas. O processo de mistura dos materiais é observado para que não sejam formados grumos e assim comprometer o desempenho e estética dos blocos. Os BTC produzidos eram maciços, com 6% de cimento e 6% de fibras secas (em massa) e foram assentados com argamassa de mesma composição dos blocos (mistura de solo-cimento-kraft), conformando prismas de 34,5x34,5x10,6cm. Os prismas foram submetidos ao ensaio de compressão diagonal que, por meio de cálculos, é deduzida a resistência a tensão de cisalhamento e o módulo de elasticidade transversal. O valor das tensões de cisalhamento médio foi de 0,566MPa e a tensão máxima à compressão simples, 5,66MPa. Os prismas apresentaram grande capacidade

em resistir aos esforços de compressão diagonal, mesmo após a tensão máxima de ruptura (Figura 3.2) e a argamassa produzida com solo-cimento-kraft apresentou alta monolicidade, com fortes ligações entre os blocos. Infelizmente, os autores não informaram a idade dos blocos, não fizeram os ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água e nem um prisma sem inclusão de fibra celulósica para comparação dos resultados.



Figura 3.2 - Prismas já rompidos ao serem levantados apresentam aderência na área de ruptura.
Fonte: Buson, Varum e Sposto (2010).

A Tabela 3.1 apresenta os melhores resultados dessas pesquisas, comparando com os valores normativos e suas amostras referência.

Tabela 3.1: Estudos de estabilização de solo-cimento (continua)

Autores	Granulometria (solo puro)			Modificação	Resistência à compressão aos 7 dias	Absorção de água aos 7 dias
	Areia	Silte	Argila			
NBR 8491 e NBR 10834 (ABNT, 2012a e 2012c)			15-50%	-	≥ 2,0MPa	≤ 20%
Faria, Battistelle e Neves (2012)	77%	5%	18%	Referência (2% de cimento)	1,35MPa	12,50%
				1:1.000 aditivo sintético DS-328, “baba-de-cupim” + 2% de cimento	2,0MPa	11,00%
Milani e Silva (2012)	50%	19%	31%	Referência (solo + 10% cimento)	1,91MPa	16,75%
				20% Lama de minério de ferro + 80% solo + 10% de cimento	2,04MPa	16,38%
Milani, Castro e Bertocini (2012)	82%	18%	0%	Referência (solo + 10% cimento)	3,01MPa	9,97%
	72%	26%	2%	50% Mineral fino de basalto + 50% solo + 10% cimento	3,12MPa	10,63%

Tabela 3.2: Estudos de estabilização de solo-cimento (conclusão)

Autores	Granulometria (solo puro)			Modificação	Resistência à compressão aos 7 dias	Absorção de água aos 7 dias
	Areia	Silte	Argila			
Soares, Bertini e Tavares Jr. (2012)	61%		39%	Referência (1:10 - cimento:solo)	2,83MPa *	11,81% *
				10% cinza de carvão mineral + 90% de cimento Portland	1,94MPa *	13,97% *
Jiménez (2010)	sem informação			Referência (6% cimento + 100% água pura)	1,7MPa	9,00%
				40% de mucilagem de palma + 60% água pura	5,5MPa	4,00%

* Os ensaios foram feitos com os corpos de prova de três dias de idade.

Fica claro que qualquer adição de estabilizante ou modificação na granulometria com outros materiais tem resultados intrinsecamente ligados às propriedades da terra utilizada como base. Portanto, qualquer estudo ou experimento de modificação da mistura base (referência) deverá ser estudada e interpretada caso a caso.

3.2 DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE CONTROLE DE FABRICAÇÃO/EXECUÇÃO VISANDO A GARANTIA DA QUALIDADE DOS PRODUTOS

O desenvolvimento de métodos de controle para a fabricação de elementos individuais e para a execução de painéis ou paredes com as técnicas de construção com terra é crucial para garantir a qualidade e a confiabilidade dessas edificações. Mesmo que a terra não seja um material de construção padronizado, a possibilidade de misturas com diversos outros insumos (incluindo aí diferentes terras) a torna bastante versátil.

Garcia, Mazzeo e Grazi (2008) desenvolveram metodologia para elaboração de controles específicos padronizados, considerando as características típicas das misturas, os métodos de construção e seu destino final, promovendo assim a execução de construções de qualidade (resistência, durabilidade e economia do produto final) com padrões mínimos de aceitabilidade, reduzindo o risco de danos ao ambiente e contribuindo para melhorar a qualidade de vida dos operários e usuários. Os autores elaboraram um *check-list* que pretende avaliar de forma global os critérios de responsabilidade de uma construção sustentável:

- Critério: Meio Ambiente
 - Respeito pelo meio, adaptação e diminuição de possível agressão,
 - respeito pela cultura e meio social da comunidade,
 - qualidade do ambiente interno da edificação, para que não afete a saúde de seus habitantes.
- Critério: Recursos
 - Consumo de água,
 - consumo de energia,
 - agressão ao solo,
 - escolha de materiais adequados, minimizando a contaminação e os resíduos.
- Critério: Qualidade da Edificação
 - Qualidade dos materiais e misturas utilizadas,
 - qualidade dos processos construtivos,
 - avaliação da manutenção e vida útil.
- Critério: Fator Humano
 - Formação de membros da comunidade para facilitar a autoconstrução supervisionada,
 - formação de profissionais em tecnologias com “ecomateriais”.

O BTC é um elemento pré-fabricado, o que possibilita bom controle na produção dos elementos, se seguido os parâmetros e processos de sua execução (já indicados no item 2.2.2.4 - Controle de qualidade dos BTC). Os estudos que desenvolvem a variação dos formatos, como encaixe e blocos intertravados, podem promover maior controle na execução das paredes e têm como objetivo a construção de alvenarias sem a necessidade de argamassa.

Fay e Ceppas (2012) redesenharam o bloco de solo-cimento de encaixe e com furos “levando em conta os parâmetros: forma e função, modulação, ergonomia, estética e aparência, técnica, economia e sustentabilidade” (Fay e Ceppas, 2012, p.4), buscando maior eficiência do sistema construtivo, uma vez que seria eliminada a argamassa de assentamento entre os blocos. A intenção foi conseguir economizar maior tempo na definição da metodologia da montagem e dos detalhes e diminuir desperdícios e tempo de execução, pela ausência de cortes, retoques e reajustes. Foram observadas as normas para o projeto no quesito dimensionamento dos blocos e ensaiadas três misturas diferentes de solo, areia e

caulim (todas as misturas adotaram estabilização com cimento Portland de 9% em peso), com o intuito de verificar se a moldagem se aplicava a diferentes condições de mistura (Figura 3.3). Os resultados de resistência à compressão e de absorção de água das três misturas ensaiadas foram superiores aos exigidos pelas normas, superando inclusive a normativa de bloco cerâmico e de concreto estrutural (melhor resultado: resistência à compressão aos sete dias de 10,8MPa; absorção de água de 19% da mistura de 14% caulim, 77% areia e 9% cimento, em peso).

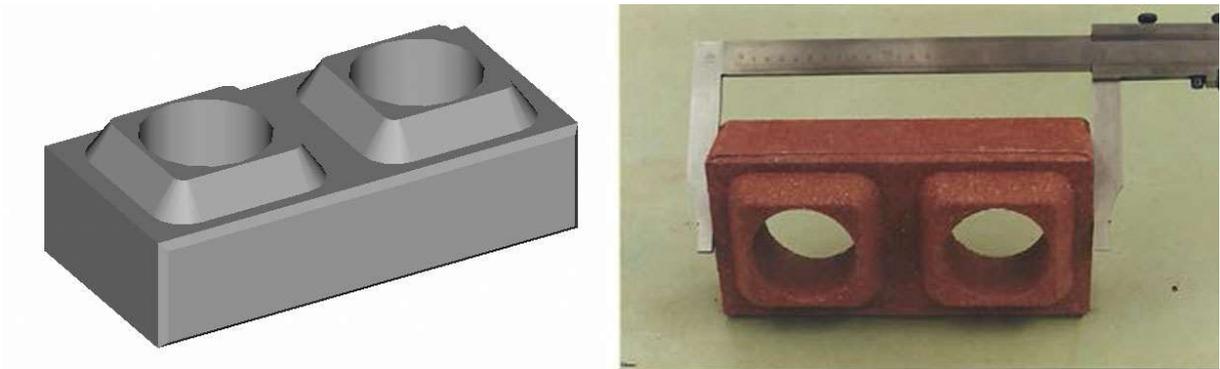


Figura 3.3 - Bloco com encaixes macho-femea e furos. Fonte: Fay e Ceppas (2012).

Os blocos articulados de solo-cimento (BaSC) são blocos fabricados como elementos de um sistema construtivo de encaixe, permitindo obter fixação estrutural sem argamassa de assentamento. Esses blocos foram desenvolvidos no *Centro Regional de Investigaciones de Tierra Cruda (CRIATiC)*, na Argentina, e chamado de sistema LAMARS. O estudo do sistema objetivou melhorar a distribuição de cargas horizontais, verticais, diminuir os riscos de fissurações e rupturas por efeitos sísmicos, além de reduzir a quantidade de material e de mão de obra necessária (portanto, o custo de produção) em relação à construção de alvenaria tradicional. A estabilidade das paredes é conseguida por insertos horizontais e verticais que, com encaixes "macho-fêmea", ligam-se uns aos outros na fiada e entre as fiadas sucessivas, garantindo a estabilidade e uniformidade da alvenaria (Mellace, Alderete e Arias, 2002).

A produção dos blocos articulados foi feita por prensa mecânica simples, concebida a partir da máquina CINVA-RAM, com modulação dos blocos que permite o preenchimento de cantos e encontro de paredes sem cortes nas peças. O sistema prevê a utilização de dois tipos básicos de blocos (BaSC-I e BaSC-II), os quais possibilitam todas as terminações possíveis (Figura 3.4). Em 2008, foi desenvolvido o bloco BaSC-III, apresentando como inovação furos

que permitem posicionar a estrutura vertical resistente a terremotos, favorecendo a redução do peso do bloco, além do aumento da seção das nervuras (encaixes macho-fêmea) promovendo maior resistência ao cisalhamento. Este novo bloco apresenta uma morfologia especial (com arestas rebaixadas) que permite o acabamento de blocos a vista (Rapisarda, 2008).

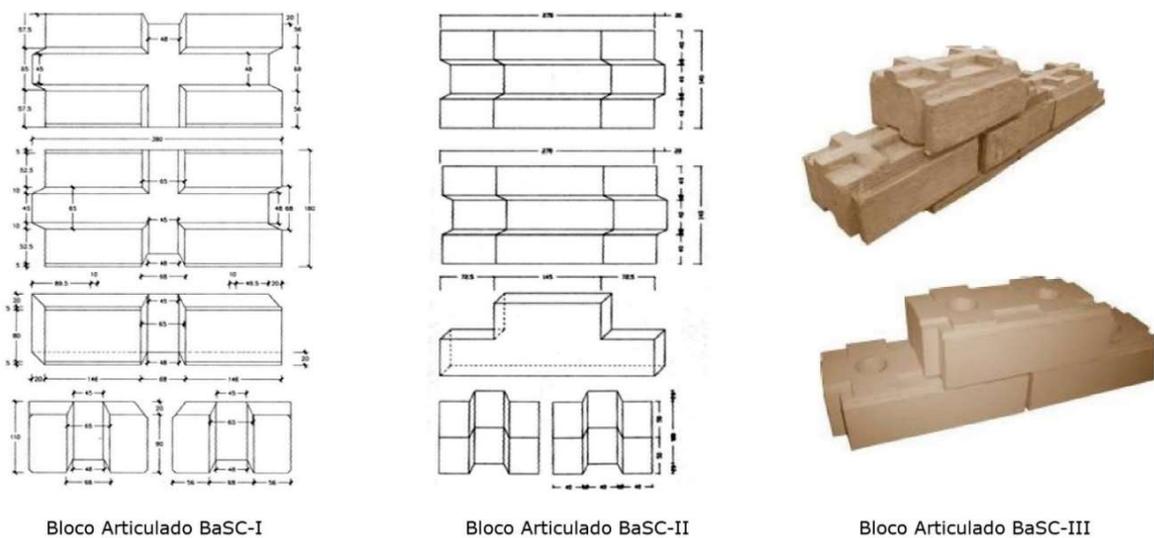


Figura 3.4 – Blocos articulados de solo-cimento do sistema LAMARS. Fontes: Mellace, Alderete e Arias (2002) e Rapisarda (2008).

J. Assis, Chahud e P. Assis (2009) fizeram estudo de paredes em BTC de dimensões 1,21x2,73x0,11m (largura, altura, espessura), com argamassa somente nos furos dos blocos da extremidade e com a inclusão de barras de ferro \varnothing 50mm (sem argamassa de assentamento), e as ensaiaram à compressão excêntrica. Os autores concluíram dos ensaios de compressão excêntrica que as paredes suportam o carregamento excêntrico e, com segurança, seria possível executar esse sistema para até três pavimentos.

Em continuação ao estudo, J. Assis, Chahud e P. Assis (2010) executaram ensaios de compressão nos blocos vazados parcialmente preenchidos e totalmente preenchidos com argamassa (Figura 3.5) e tiveram como resultado 2,3MPa e 4,1MPa, respectivamente. Outro ensaio executado foi o de flexão sob carga horizontal uniformemente distribuída em parede de dimensões 3,96x2,70x0,11m (largura, altura, espessura), a qual possuía barras de ferro \varnothing 50mm nas extremidades, em volta do vão da porta e cinta superior. Os autores concluíram que “as paredes estudadas atenderam perfeitamente às exigências de: (i) deslocamento horizontal máximo; (ii) carga distribuída para o deslocamento máximo entre 600 Pa e 800 Pa;

e (iii) paredes isentas de fissuras para carga até 1,20 kPa” (J. Assis, Chahud e P. Assis, 2010, p.9), tendo como referência a norma sul-africana ASA Booklet B1 e B2.

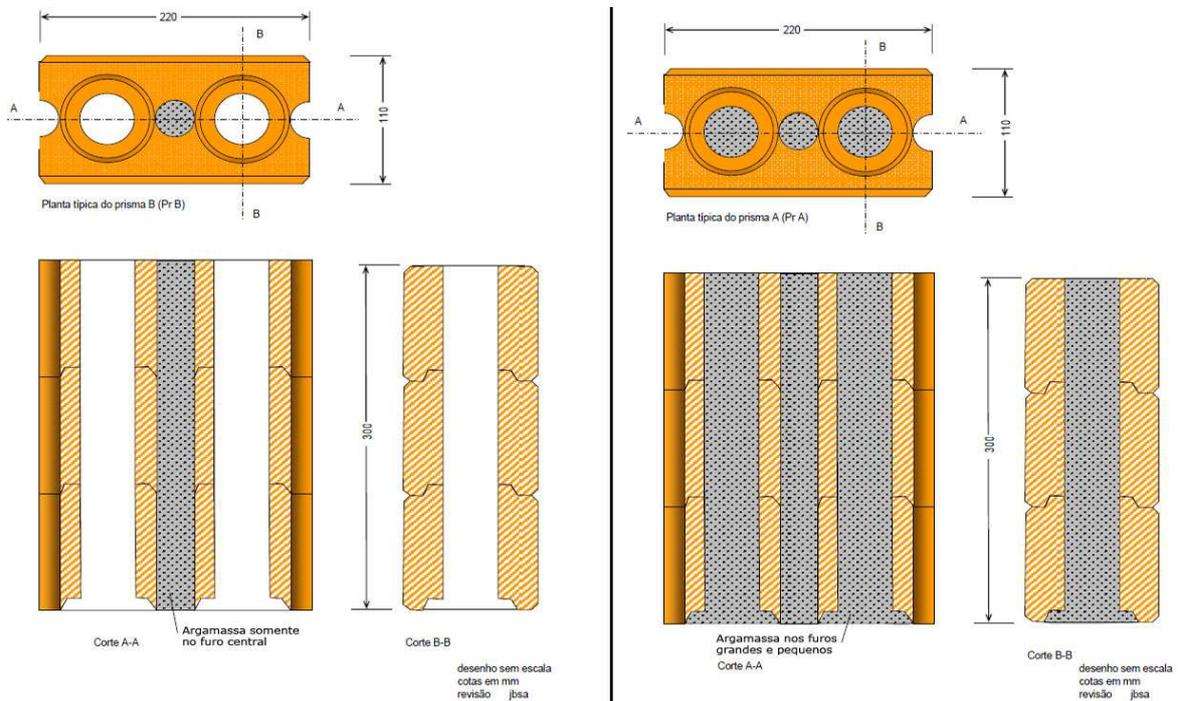


Figura 3.5 - Plantas e contes dos prismas parcialmente preenchidos e totalmente preenchidos.

Fonte: J. Assis, Chahud e P. Assis, 2010.

As paredes de taipa de pilão ou painéis de solo-cimento também receberam atenção de pesquisa quanto ao desenvolvimento de métodos de controle para a fabricação. Mag e Rauch (2011) apresentaram sistema de industrialização da taipa que permite a racionalização dos custos de trabalho e tempos de execução das edificações. “A pré-fabricação é um passo para a modernização da construção com terra e deve dar lugar a um material como matéria-mercado de terras do edifício” (Mag e Rauch, 2011, p. 35). Com maior controle na fabricação dos painéis, as dosagens de terra, água e estabilizantes são mais eficazes, melhor qualidade da execução, principalmente o grau de compactação e o acabamento final.

As vantagens do sistema de taipa pré-fabricada são as mesmas de outras técnicas racionalizadas: menor desperdício na produção; maior controle de qualidade; produção independente das intempéries; maior flexibilidade nas dimensões das peças; integração das instalações hidráulicas, elétricas e de condicionamento, sem afetar a aparência final; melhor planejamento e coordenação de obra e redução do tempo de execução final. O peso das peças e seu transporte podem tornar-se uma desvantagem, se a distância entre a fábrica e a obra for grande, porém, segundo Mag e Rauch (2011), a prática mostrou que peças pré-fabricadas

de até 7 ton foram transportadas por distâncias superiores a 800km com maior economia do que se tivessem sido construídas *in loco*, pois o sistema de transporte é mais barato que o de produção.



Figura 3.6 - Taipa pré-fabricada sendo produzida e instalada na obra. Fonte: Mag e Rauch, 2011.

3.3 SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO, VISANDO AUMENTAR A PRODUTIVIDADE E DIMINUIR O ESFORÇO FÍSICO NO ATO DE CONSTRUIR

A racionalização e industrialização da construção civil moderna exige, dos sistemas construtivos e dos profissionais envolvidos, métodos que diminuam os prazos de execução e que tenham resultados finais satisfatórios do ponto de vista dos desempenhos técnico, econômico e estético. Essa exigência ultrapassa o atendimento à segurança e conforto dos usuários: devem ser levados em conta a diminuição do consumo de energia, a geração de resíduos e retrabalhos (desperdício material e de mão de obra) e a redução do esforço físico dos trabalhadores, além dos princípios de sustentabilidade (tripé econômico-ambiental-social).

Nesse sentido, pesquisas que otimizem os processos construtivos mais arcaicos e artesanais, sistematizando-os, são indispensáveis para trazer as técnicas tradicionais à contemporaneidade, sempre baseando-se no conceito de tecnologias apropriadas, para que as técnicas de construção com terra sejam vistas como seguras pelos usuários.

Veraldo *et al* (2014) apresentaram estudo da execução de um protótipo de casa em taipa de pilão em Campo Grande (MS). A edificação de 107,3m² foi construída com paredes portantes de 20cm de espessura. O processo construtivo utilizou formas metálicas treliçadas e fechamento com chapas de compensado plastificado. Durante a construção, foram medidos

e analisados os tempos de execução de paredes com duas metodologias diferentes para a mistura do material: uma utilizou betoneira convencional como misturador alimentado com baldes e a outra com um conjunto de máquinas composto por uma peneira rotativa, um misturador homogeneizador hexagonal, um triturador e esteiras transportadoras (as demais etapas seguiram procedimentos idênticos). Verificou-se que a mistura feita com a betoneira convencional “mostrou-se mais adequada no processo construtivo, quando comparado com a aplicação do conjunto de maquinários (misturador, esteira e triturador), devido à melhor produtividade (48min/m² contra 60min/m²) e desempenho físico-mecânico do produto final.” (Veraldo *et al*, 2014, p.7).

Comparando com o método de execução utilizado por Milani *et al* (2008, apud Veraldo *et al*, 2014), também em taipa de pilão, que utilizaram formas de compensado estruturadas com sarrafos, a mistura feita com enxadas, compactação com pilão de madeira e produtividade de 90min/m², a utilização de mistura e homogeneização mecanizada, formas metálicas treliçadas e compactação com compactador pneumático foi mais eficiente, ganhando até 42min/m² de produtividade, além de menor esforço dos operários (Veraldo *et al*, 2014).

Heise, Minto e Hoffmann (2012) apresentaram um estudo de caso de construção de paredes de taipa de pilão no estado de São Paulo. Os autores dividiram o processo construtivo em quatro etapas: preparação do traço; montagem das formas; compactação do solo, e desmontagem das formas, e focaram o estudo na primeira (preparação do traço). As duas paredes estudadas receberam a mesma matéria-prima (terra+aglomerante), o mesmo tipo de compactação (compactador pneumático), o mesmo sistema de formas (treliças metálicas e chapas de compensado plastificados) e desmontagem; a diferença foi o preparo da mistura: uma parede foi mecanizada e outra manual. Verificou-se melhor desempenho na parede misturada mecanicamente, com custo menor (apesar de maior gasto de energia elétrica), melhor acabamento (textura, cor, lisura) e expectativa de menor manutenção; em entrevista com os agentes envolvidos (construtor, mão de obra e usuário), a parede misturada mecanicamente também teve melhor avaliação, sendo mais produtiva (menor tempo de execução), melhor construtibilidade (menor esforço físico na preparação) e melhor aspecto visual.

Outro conceito inserido atualmente na indústria da construção civil, desenvolvido no ambiente fabril, é o da Mentalidade Enxuta (*Lean Thinking*), apresentado por Heise, Granja e Picchi (2010). A metodologia foi aplicada à execução de painéis monolíticos de taipa de pilão e, a partir de seus cinco princípios (Valor, Fluxo de Valor, Fluxo, Produção Puxada, Perfeição), os autores analisaram os processos de produção dos painéis teoricamente. Identificaram oportunidades de aplicação da metodologia e melhoras nos processos, o que poderia trazer ganhos como a redução dos custos da produção, a eliminação dos desperdícios (dos materiais e da hora-homem), além de melhorar o resultado final do produto.

3.4 ELABORAÇÃO DE RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E PROJETOS ADEQUADOS ÀS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DA REGIÃO E TRADIÇÃO CULTURAL

Estudos realizados nos últimos anos também apontam inovações às recomendações técnicas de projeto e de execução de obras em terra, revisões e críticas mais elaboradas às normas e “manuais” de construção ultrapassados, além de investigações sobre manutenção e preservação do patrimônio construído com tais sistemas.

Análises técnicas feitas alguns anos após a conclusão de obras edificadas em terra e ocupadas, desde então, trazem informações importantes para melhorar a qualidade tanto do projeto quanto da técnica construtiva utilizada. Esse foi o estudo de Barbosa *et al* (2008) e Salmar, Negreiros e Tognon (2005), que avaliaram residências construídas após dez anos de uso.

Barbosa *et al* (2008) apresentou a avaliação pós-ocupação de edificações residenciais em um bairro carente da cidade de Sapé (PB), as quais foram construídas com blocos “Mattone” (BTC com encaixe e assentadas com argamassa fluida). Já Salmar, Negreiros e Tognon (2005) avaliaram uma residência unifamiliar de 257m², divididos em dois pavimentos, construída com paredes estruturais monolíticas de solo-cimento em Campinas (SP). Ambas as avaliações pós-ocupação apontaram como uma das principais causas das patologias a falta de manutenção das edificações pelos ocupantes. Outras patologias encontradas mostram que aperfeiçoamentos devem ser feitos em todos os processos (projeto, execução e utilização da edificação) para diminuir ou eliminar os problemas como: pequenos recalques das fundações devidos à falta de zelo dos moradores com a água de chuva que escorre com velocidade e carrega o solo, descalçando as paredes e fundações; descolamento do reboco e estufamento

da pintura devido à criação de jardim próximo à base das paredes pelo lado externo, que permitiu contato de maior umidade com os painéis monolíticos; acréscimos (“puxadinhos”) sem nenhum critério que deixam o ambiente insalubre e mal visto, reforçando os preconceitos do uso da terra como material de construção.

Sendo a terra um material que não possui padronização e os blocos de terra comprimida distribuídos no mercado da construção no Brasil com variadas dimensões, formas e tamanhos, Silva, Milani e Bertocini (2010) executaram ensaios de resistência à compressão, seguindo os procedimentos descritos nas normas NBR 10834:2012 e NBR 8491:2012, blocos e tijolos de solo-cimento, respectivamente, (ABNT, 2012c e 2012a) para comparar seus métodos. Os autores problematizam as metodologias das normas de bloco vazado de solo-cimento e tijolo maciço quanto ao ensaio à compressão, levando em conta a argamassa de capeamento (com ou sem), altura dos corpos de prova (tijolo/bloco inteiro ou cortado e sobreposto). Concluíram que a argamassa de regularização (capeamento) promove um efeito negativo no ensaio de compressão simples por ter resistência diferente do bloco e uma possível excentricidade no carregamento; também verificaram que os prismas (blocos cortados ao meio e sobrepostos) aparentam maior resistência, o que se explica pelo efeito de confinamento de cargas mais acentuado devido à relação altura/largura, e pode camuflar a resistência real do bloco.

No âmbito da preservação e restauração de monumentos construídos, Hoffmann e Gonçalves (2010) fizeram estudo com o objetivo de verificar a possibilidade de utilização de ensaios não destrutivos para analisar as características de painéis de taipa de pilão, por meio de ondas ultrassônicas. A caracterização de materiais como madeira, concreto e outros é, atualmente, aplicada à técnica de ultrassom e, por meio da analogia dos conceitos e equações, a propagação de ondas no interior de corpos de prova de terra compactada, foi avaliada como adequada. Foram obtidos os módulos de elasticidade longitudinal, elasticidade transversal e coeficiente de Poisson dentro do intervalo esperado para o material analisado. Esse estudo contribui para o desenvolvimento de metodologia de verificação das propriedades físicas das paredes de edificações históricas em processo de preservação ou restauração através de ensaio não destrutivo e com bom grau de confiabilidade.

Ainda no âmbito da preservação e restauração de construções históricas, Ramos (2003) apresentou estudo do grupo de pesquisa relacionado aos usos e aplicações da

construção com terra da Universidade Politécnica de Madri, na Espanha. O autor apresentou processos modernizados da construção com terra, para o restauro do patrimônio (exemplificando no restauro do castelo de *Toral de los Guzmanes*) e para novas edificações, utilizando tecnologia atual. Argumenta que materiais como a terra proporcionam “arquitetura saudável” e regional, e critica as tipologias globalizantes da arquitetura moderna e contemporânea.

4 CONFORTO DA CONSTRUÇÃO COM TERRA

Por que há a sensação de conforto numa casa construída com terra? Por que esse tipo de construção permite às pessoas sentir maior intimidade e prazer, diferente da maioria das construções modernas? Certamente essas questões não têm respostas absolutas. Esse capítulo propõe a discussão do conforto ambiental na habitação edificada com terra, de maneira sistêmica, tratando dos aspectos do corpo físico e mental, abordando questões objetivas e subjetivas que envolvem o ser humano e o prazer de estar em um lugar. Analisa habitação e terra por meio de diversas áreas nas quais o conceito de conforto esteja presente (arquitetura, engenharia, física, filosofia, história, medicina, biologia, química e psicologia).

Essa análise foi desenvolvida em quatro temáticas, tratando o conceito de conforto de forma sistêmica e apresentando conceitos que envolvem memória, percepção, fisiologia, espacialidade e conforto físico e psicológico de maneira ampla. Essas temáticas, chamadas aqui de "dimensões", são: fisiológica, natural / genética, psicológica e espacial. Os tópicos estão separados apenas para maior aprofundamento de cada um, mas são percebidos concomitantemente, e não como a soma de cada um deles.

Um desses aspectos, o comportamento térmico das edificações, é influenciado especialmente pelo clima local, pelas ações antropogênicas e pelos parâmetros de design da construção (geometria, materiais, orientação etc.). Compreender os fenômenos das trocas de calor é fundamental para o melhor entendimento desse comportamento térmico, auxilia na assimilação acerca do clima e da relação entre o corpo humano e o ambiente térmico.

4.1 DIMENSÃO FISIOLÓGICA

O conforto térmico (fisiológico) é mais fácil de quantificar, ainda que sua avaliação seja subjetiva. Estar confortável termicamente em relação a um acontecimento num espaço, observando-o ou sentindo-o, implica em não ter preocupação ou incômodo. O conforto térmico é obtido quando o organismo produz calor através do metabolismo (compatível com sua atividade física) numa taxa equivalente à perda para o ambiente, sem necessitar de nenhum mecanismo de termorregulação. Portanto, estamos num ambiente confortável termicamente quando temos uma relação de neutralidade, porém sua avaliação é subjetiva.

A pele é o principal órgão responsável pelo regulamento da temperatura do corpo, chamado termorregulação (a respiração também tem papel nesse mecanismo). Segundo Frota e Schiffer (2009), ao sentir desconforto térmico, é ativado o mecanismo vasomotor do fluxo sanguíneo (vasodilatação ou vasoconstrição). A resistência térmica da pele varia em função do fluxo sanguíneo que a percorre, regulando sua temperatura. Além desse, há "outro mecanismo de termorregulação da pele [que é] a transpiração ativa" (FROTA; SCHIFFER, 2009, p. 23).

A pele é um dos órgãos receptores dos estímulos do tato. Esse sentido é tido como o "pai de todos os sentidos", segundo opinião do antropólogo Ashley Montagu, citado por Pallasmaa, que também afirma que a pele

é nosso órgão mais antigo e mais sensível, nosso primeiro meio de comunicação e nossa protetora mais eficiente... Até mesmo a córnea transparente dos olhos é coberta por uma camada de pele modificada... O tato é pai de nossos olhos, nosso nariz, nossa boca. Ele é o sentido que se especializou e gerou os demais, algo que parece ser reconhecido pelo fato de ser considerado há muito tempo 'o pai de todos os sentidos. (Pallasmaa, 2011, p. 10)

Adicionalmente, Merleau-Ponty (2006) argumenta que o indivíduo percebe os estímulos com todos os sentidos humanos juntos. Cita que, ao ouvir as palavras "quente" ou "úmido", o sujeito experimenta um sentimento de calor ou frio, e seu organismo se prepara para o referido evento. Ou seja, a expectativa do usuário quanto à temperatura também influencia no conforto.

Assim, o organismo percebe o "espaço térmico" através dos sentidos e, somando variáveis tais como vestimenta, taxa metabólica, atividade, aclimação, expectativa climática entre outras, pode-se dizer se está ou não em conforto térmico. Ainda que exista a avaliação subjetiva do conforto térmico (algumas pessoas preferem sentir mais frio ou calor que outras num mesmo ambiente), índices de conforto térmico conseguem indicar uma maior predileção das variáveis ambientais mais importantes, como temperatura, velocidade e umidade do ar.

A norma brasileira NBR 15575:2013 – Desempenho de edificações (ABNT, 2013) apresenta critérios para avaliação do desempenho térmico de paredes: transmitância térmica

e capacidade térmica. Já a NBR 15220:2005 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) apresenta a metodologia de cálculo para cada um desses parâmetros e outros, como atraso térmico e fator de ganho de calor solar, que não serão utilizados nessa pesquisa. O estudo desses parâmetros que envolvem o desempenho térmico das edificações será apresentado a seguir.

4.1.1 Influências das trocas térmicas secas no conforto térmico do interior da edificação

A transferência de calor (um meio mais “quente” perde calor para um meio mais “frio”) pode ocorrer por meio das trocas secas (calor sensível) ou trocas úmidas (calor latente). As trocas secas abrangem as variações de temperatura enquanto as trocas úmidas são relativas às trocas térmicas devido à mudança de fase. Os processos de trocas de calor secas são convecção, radiação e condução (Figura 4.1).

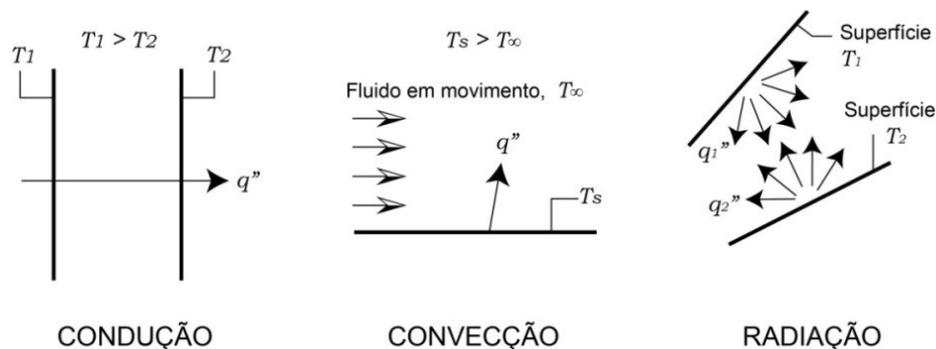


Figura 4.1 – Trocas secas de calor: condução, convecção e radiação. Fonte: Incropera et al, 2007, p.2.

4.1.2 Resistência térmica superficial e condutância térmica superficial

O coeficiente de condutância térmica superficial e a resistência térmica superficial expressam as trocas de calor que envolvem convecção e radiação. Portanto, englobam as trocas térmicas que ocorrem na superfície do sólido (parede). Assim, tomando-se como exemplo uma lâmina que separa dois ambientes (um externo e outro interno) com temperaturas diferentes, as trocas superficiais podem ser expressas pelos coeficientes de condutância térmica superficiais – h :

$$h_e + h_i = h \quad [\text{W}/\text{m}^2.\text{K}] \quad (4.1)$$

onde:

h_e - coeficiente de condutância térmica superficial externa $[\text{W}/\text{m}^2.\text{K}]$;

h_i - coeficiente de condutância térmica superficial interna $[\text{W}/\text{m}^2.\text{K}]$.

Frota e Shiffer (2003) esclarecem que as resistências térmicas superficiais são o inverso das condutâncias térmicas superficiais, ou seja, a resistência térmica superficial interna

$$R_{si} = \frac{1}{h_i}, \text{ e a resistência térmica superficial externa } R_{se} = \frac{1}{h_e}.$$

A resistência superficial externa - R_{se} - e a superficial interna - R_{si} - são obtidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resistência térmica superficial interna e externa.

R_{si} ($\text{m}^2\text{C} / \text{W}$)			R_{se} ($\text{m}^2\text{C} / \text{W}$)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
→	----- ↑	↓ -----	→	----- ↑	↓ -----
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: ABNT, 2005, p.07.

4.1.3 Resistência térmica do componente e total

A resistência térmica de um componente é calculada em função de suas camadas e são duas as formas de cálculo: uma para componentes com camadas homogêneas e outra para componentes com camadas não homogêneas. Ambas as maneiras pretendem encontrar o valor da resistência térmica total - R_T .

A resistência térmica - R_t - é o quociente entre a espessura do elemento pelo seu coeficiente de condutibilidade térmica e é utilizada para uma camada homogênea de material sólido, sendo:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}] \quad (4.2)$$

onde:

e - espessura do material [m].

λ - coeficiente de condutibilidade térmica do material [W/m.K];

A resistência térmica de superfície à superfície de um componente plano - R_t - constituído de camadas homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é representada pela equação:

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + R_{arn} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}] \quad (4.3)$$

onde,

R_t - resistência térmica, de superfície a superfície do componente [m².K /W];

$R_{t1}; R_{t2}; R_{tn}$ - resistências térmicas das n camadas homogêneas [m².K /W];

$R_{ar1}; R_{ar2}; R_{arn}$ - resistência térmica das n camada de ar [m².K /W].

Já a resistência térmica de superfície à superfície de um componente plano - R_t - constituído de camadas não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é representada pela equação:

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{C} / \text{W}] \quad (4.4)$$

onde,

$R_a; R_b; R_n$ - resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção (a, b, n) determinadas pela Equação 4.3 [m².K/W];

$A_a; A_b; A_n$ - áreas de cada seção [m²].

Dessa forma, a resistência térmica total ou resistência térmica de ambiente a ambiente - R_T - é, como descrito na NBR 15220-1 (ABNT, 2005, p.2), o “somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo

as resistências superficiais interna e externa”, tanto para componentes constituídos por camadas homogêneas e não homogêneas, pode ser representada pela equação:

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad [m^2C/W] \quad (4.5)$$

4.1.4 Coeficiente global de transmissão térmica ou transmitância térmica

O coeficiente global de transmissão térmica – U – expressa as trocas de calor superficiais (convecção e radiação) e as trocas térmicas através do material (condução); como ensinam Frota e Shiffer (2003, p.38) “englobam as trocas de calor referentes a um determinado material segundo a espessura da lâmina, o coeficiente de condutibilidade térmica, a posição horizontal ou vertical da lâmina e, ainda, o sentido do fluxo”. O coeficiente global de transmissão térmica pode ser definido com um fluxo expresso em $W/m^2.K$ que atravessa uma área unitária do componente quando existe um gradiente térmico de $1K$ entre suas faces opostas. É o inverso da resistência térmica total - R_T - e representado pela equação:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad [W/ m^2.K] \quad (4.6)$$

4.1.5 Capacidade térmica dos componentes

A capacidade térmica de componentes - C_T – envolve os três processos de troca de calor seca: condução, convecção e radiação. É a grandeza que, como ensinam Incropera *et al* “mede a capacidade de um material de armazenar energia térmica” (2007, p.43).

Expressa em $kJ/m^2.K$, é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um componente por área unitária, e, quando em camada homogênea é representada pela equação:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad [kJ/m^2.K] \quad (4.7)$$

onde,

λ_i - condutividade térmica do material da camada i	[W/m.K];
R_i - resistências térmicas da camada i	[m ² .K/W];
e_i - espessura da camada i	[m];
c_i - calor específico do material da camada i	[kJ/(kg.K)];

ρ_i - densidade de massa aparente do material da camada i ; [kg/m³].

A capacidade térmica de componentes - C_T - com camadas não homogêneas é representada pela equação:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad [\text{kJ/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (4.8)$$

onde,

C_{Ta} ; C_{Tb} ; C_{Tn} - capacidades térmicas do componente, para cada seção [m².K/W];

A_a ; A_b ; A_n - áreas de cada seção [m²].

4.1.6 Desempenho térmico segundo NBR 15575:2013

A norma NBR 15575:2013 – Desempenho de edifícios habitacionais (ABNT, 2013) estabelece, em sua Parte 1, os procedimentos normativos para avaliação do desempenho térmico dos sistemas de vedação e cobertura. Eles são o Simplificado: avaliação de desempenho térmico é realizada verificando a transmitância térmica e a capacidade térmica dos materiais; e o Detalhado: simulação computacional do desempenho térmico global da edificação.

O Apêndice B apresenta os cálculos do Método Simplificado conforme descrição da norma NBR 15220-2:2005 para três exemplos de técnicas construtivas: taipa de pilão, BTC e parede convencional. A Tabela 4.2 apresenta os resultados das três paredes estudadas, todas com a mesma espessura total (15cm) para que se possa fazer as comparações diretamente. Também foi utilizada a mesma absorvância para radiação solar - $\alpha = 0,30$ – que corresponde à pintura branca (ABNT, 2005, p.08).

A parte 4 da NBR 15575:2013 (ABNT, 2013) trata dos sistemas de vedação verticais internas e externas e apresenta como critérios de avaliação do desempenho térmico das vedações externas a transmitância térmica e a capacidade térmica. Essas grandezas físicas traduzem melhor o efeito da inércia térmica, além de serem consagradas e validadas pela literatura especializada (Orui, 2014). A Tabela 4.2 apresenta os valores admitidos pela NBR 15575:2013 e a classificação das paredes calculadas, para a Zona Bioclimática 3 (São Paulo, segundo a NBR 15220:2005, Parte 3):

Tabela 4.2 – Apresentação dos resultados dos cálculos

Sistema construtivo	Densidade (ρ)	Condução Térmica (λ)	Calor específico (c)	U	C_T	Diretrizes da NBR 15575 para ZB3	
	[kg/m ³]	[W/m K]	[J/kg K]	[W/(m ² .K)]	[kJ/(m ² .K)]	U < 3,7 ($\alpha < 0,6$)	$C_T > 130$
Taipa de pilão 703 (70% areia + 30% silte e argila)	1980	0,87	868	2,92	257,8	M	M
BTC estabilizado	1868	0,49	750	2,11	165,86	M	M
Parede convencional	-	-	-	2,24	167	M	M

Levando-se em conta apenas os parâmetros térmicos para a Zona Bioclimática 3 e os critérios da NBR 15575-4:2013 para vedações externas, as três tipologias de parede recebem o nível de aceitação *M* (denominado Mínimo).

O Método Detalhado, que avalia o desempenho térmico da edificação por meio de simulação computacional, foi explorado na pesquisa de Orui (2015). A autora utilizou para os BTC estabilizados (15cm de espessura) a pintura cor marrom claro ($\alpha=0,70$) e para a parede monolítica de solo-cimento compactado (10cm de espessura), pintura branca ($\alpha=0,30$), além da taxa de renovação de ar de 1 ren/h. A Tabela 4.3 apresenta as propriedades dos sistemas construtivos, as temperaturas externas do dia típico de verão - $t_{e,max}$ - e a temperatura interna máxima do ambiente escolhido - $t_{i,max}$. As simulações para os dias típicos de inverno não representaram a realidade e por isso não serão apresentadas (a autora utilizou como temperatura externa mínima para São Paulo -3,7°C).

Tabela 4.3 - Avaliação do desempenho térmico através de simulação computacional, para dia típico de verão em São Paulo.

Sistema Construtivo	Densidade (ρ)	Condução Térmica (λ)	Calor específico (c)	Sombreamento das aberturas	T_i, max [°C]	Diretrizes da NBR 15575 (São Paulo)	
	[kg/m ³]	[W/m K]	[J/kg K]			T_e, max [°C]	Nível de desempenho
Solo-cimento compactado (10cm) $\alpha=0,30$	1713	0,65	800	não	29,6	31,9	Intermediário
BTC estabilizado (15cm) $\alpha=0,70$	1868	0,49	750	sim	31,5	31,9	Mínimo

Fonte: Orui, 2015.

Uma vez que a simulação deve abranger toda a edificação, o projeto arquitetônico influencia bastante nos resultados, mesmo seguindo todas as orientações da norma (taxa de renovação de ar, orientação solar). Ainda assim, é possível verificar que esses sistemas construtivos se enquadram como desempenho térmico mínimo ou intermediário, tendo sua avaliação, segundo os critérios da NBR 15575:2013, aprovados.

4.1.7 Influências da umidade no conforto térmico do interior da edificação

A umidade é muitas vezes tratada como uma das principais patologias das edificações em geral; umidade em excesso causada por vazamentos, infiltrações de água, má impermeabilização que permite a ascensão do lençol freático são alguns exemplos. A palavra "umidade" na construção é quase sinônimo de condensação e provoca danos acentuados (Padfield, 1998).

Em muitas pesquisas sobre conforto térmico, a temperatura do ar interna é bem analisada, porém deixam de lado a umidade, mesmo que esta tenha grande interferência na qualidade do ar. A umidade relativa do ar interior pode afetar significativamente o conforto térmico, a percepção da qualidade do ar, a saúde dos ocupantes, o consumo de energia elétrica e a durabilidade dos materiais de construção (Padfield, 1998; Simonson *et al*, 2002).

Minke (2001) cita, como exemplo, a umidade relativa do ar entre 50% e 70%, que reduz a quantidade de pó fino no ar, ativa os mecanismos de proteção da pele contra micro-organismos, diminui a vida de muitas bactérias e vírus, além de diminuir os odores e eletricidade estática nas superfícies dos objetos.

O calor e a umidade relacionam-se no Balanço Energético. Se por um lado, a condutividade térmica e a capacidade térmica são alteradas pela quantidade de umidade, por outro, o balanço de massa depende, além do conteúdo de umidade, da temperatura (Mendes, 1997).

Uma vez que os materiais de construção comumente utilizados são porosos, a transferência de umidade é importante tema a ser avaliado. A porosidade implica na existência das três fases do material: sólida (o material em si), líquida (água absorvida pelos poros) e gasosa (ar e vapor d'água nos poros) (Pires, 2013).

4.1.8 Higroscopia

Higroscopia é a propriedade que relaciona a capacidade dos materiais de absorverem e restituírem umidade ao ambiente, em função de sua porosidade superficial. Assim, um material pode ser chamado higroscópico quando seu teor de umidade varia em função da umidade relativa do ambiente (Torgal *et al*, 2009). Como os elementos construtivos são porosos, as trocas de calor úmidas podem ocorrer tanto nas camadas superficiais quanto no interior dos elementos.

Alguns tipos de argila possuem elevado grau de higroscopia e podem auxiliar na manutenção da estabilidade da umidade relativa do ambiente. Essa capacidade de absorção de água é resultante da grande superfície específica dos minerais: dimensão muito reduzida e forma lamelar ou fibrosa das partículas, além da carga elétrica negativa, que, em contato com as moléculas de água é compensada (Pires, 2013). A autora cita a illita, a caulinita e esmectita, nessa ordem (menor para maior), como argilas com alto grau de higroscopia.

Minke (2001) apresenta o gráfico (Figura 4.2) com as curvas de absorção de paredes interiores de 11,5cm de espessura, construídas com materiais diferentes, que, com temperatura constante, houve o aumento súbito de umidade relativa de 50% para 80%. Fica clara a relação direta entre porosidade e absorção da água: o tamanho e a distribuição dos poros determina o grau de absorção da água. No experimento, a parede construída em adobe (terra siltosa) sem reboco absorveu quase 900g/m² de vapor d'água (e desorveu a mesma quantidade quando a umidade relativa diminuiu de 80% para 50%).

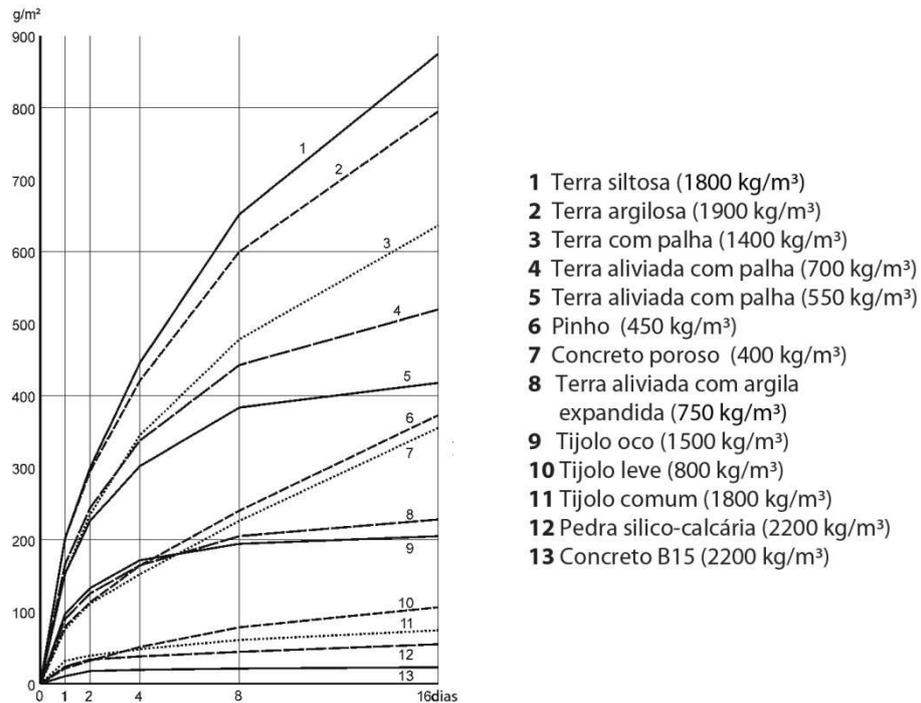


Figura 4.2 – Curvas de absorção de uma parede interior com 11,5 centímetros com ambas as faces expostas a temperatura de 21°C, após um aumento súbito na umidade relativa do ar 50% a 80%.

Fonte: Minke, 2001, p.21.

As construções de terra têm a capacidade de regular a umidade relativa dos ambientes, proporcionando um equilíbrio e estabilidade (Minke, 2001; Ponte, 2012). Um estudo alemão feito numa habitação mostrou que, em oito anos de medição, a umidade relativa do ar em seu interior foi de 50% durante todo o ano, com variação entre 45% a 55%, oferecendo condições de vida mais saudáveis (Minke, 2001).

Um ensaio desenvolvido por Rode *et al* (2005), chamado NORDTEST, aponta a capacidade de amortecimento da umidade relativa dos materiais por um parâmetro chamado de *Moisture Buffer Value* (MBV). Esse parâmetro é definido como a capacidade dos materiais atenuarem as variações da umidade relativa num ambiente e pode ser usado para descrever e comparar o potencial de tamponamento da umidade de materiais de construção (Rode *et al*, 2005). O valor de $MBV_{practical}$ representa ao quanto de água que é transportada para dentro e para fora do material, por unidade de área de superfície, durante certo período de tempo, enquanto é submetido a variações de umidade relativa do ar. Este parâmetro é expresso em $kg/(m^2 \cdot \%UR)$ (Figura 4.3).

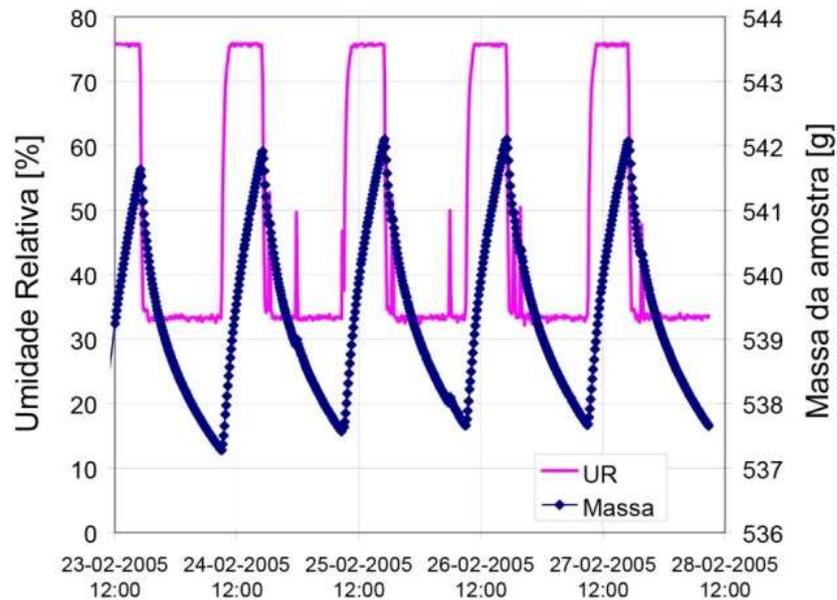


Figura 4.3 – Ciclos de absorção e liberação de umidade (entre 33%HR e 75%UR). Fonte: RODE et al. 2005, p.29.

Rode *et al* (2005) classificam em termos da capacidade de amortecimento da umidade relativa dos materiais, de acordo com seu valor de $MBV_{pratical}$ (Tabela 4.4). Essa classificação se adequa a situações nas quais os materiais são expostos a umidade e temperatura semelhantes àquelas definidas no ensaio, admitindo certo grau de variações. Os pesquisadores analisaram resultados de vários ensaios, feitos em diferentes laboratórios para os mesmos materiais, a fim de fundamentar e verificar os procedimentos e protocolos do ensaio (Rode *et al*, 2005).

Tabela 4.4 – Classificação de materiais de acordo com seu MBV

MBV [g/m ² .%UR]	Classificação
0 a 0,2	Desprezível
0,2 a 0,5	Limitado
0,5 a 1,0	Moderado
1,0 a 2,0	Bom
> 2,0	Excelente

Fonte: . adaptado de Rode et al (2005).

O mesmo procedimento foi utilizado por McGregor *et al* (2014) em amostras de BTC e BTC estabilizados com cimento e cal e Allinson e Hall (2012) em amostras de taipa de pilão com diferentes proporções de partículas (pedregulho, areia, silte e argila). A Tabela 4.5 apresenta resultados resumidos das pesquisas.

Tabela 4.5 – Dados e resultados dos ensaios de MBV.

Material	Densidade * [kg/m ³]	MBV * [g/(m ² .%UR)]	Classificação
Placa de concreto	2250	0,38	Limitado
Placa de gesso acartonado	1000	0,64	Moderado
Placa de concreto celular	500	1,04	Bom
Tijolo queimado comum	1600	0,48	Limitado
BTC não estabilizado	1783	2,7	Excelente
BTC+4% cimento	1737	2,1	Excelente
BTC+8% cimento	1769	2,4	Excelente
BTC+4% cal	1751	2,5	Excelente
BTC+8% cal	1751	2,2	Excelente
Taipa de pilão 703 (70% areia + 30% silte e argila)	1980	1,29	Bom
Taipa de pilão 433 (40% areia + 30% pedregulho + 30% silte e argila)	2120	0,61	Moderado
Taipa de pilão 613 (60% areia + 10% pedregulho + 30% silte e argila)	2020	0,68	Moderado

* Densidade e MBV apresentados são a média dos valores das três amostras apresentadas pelos autores.

Fonte: Adaptado de Rode *et al* (2005) e McGregor *et al* (2014).

Os valores das amostras de taipa de pilão sem pedregulho (703) e BTC, classificadas como bom e excelente respectivamente, apontam para o maior controle da umidade relativa do ar e condensação em edifícios construídos com essas técnicas. Esses dados mostram a possibilidade da melhora da qualidade do ar interior, evitam danos aos equipamentos e fechamentos das edificações, diminuem a incidência de pó fino e proliferação de micro-organismos e melhoram o conforto térmico dos ocupantes.

O controle passivo da umidade pelas paredes da edificação pode reduzir, ou mesmo eliminar, a necessidade de condicionamento artificial, reduzindo o consumo de energia elétrica e melhorando a qualidade do ar.

4.2 DIMENSÃO NATURAL / GENÉTICA

A memória genética e as experiências passadas fornecem ao ser humano um conceito de conforto externo ao corpo físico; estão no psíquico, ligado à consciência interna de si. A memória genética é a memória herdada através do código genético que vem a influenciar o comportamento humano. Essa memória proporciona conforto enquanto segurança e proteção quando relacionados à origem, na sua forma mais primitiva. Pallasmaa (2011, p. 57)

reforça esse conceito quando fala das "nossas sensações de conforto, proteção e lar [que] estão enraizadas nas experiências primitivas de incontáveis gerações".

Segundo Morin (1974), desde Darwin, o homem sabe que é filho de primatas, porém não se considera um primata. Foi convencido da fuga de sua árvore genealógica tropical de seus antepassados, construindo o reino independente da cultura, fora da Natureza. Por outro lado, o jovem Marx, em seu manuscrito de 1844, afirmava que "o primeiro objeto do homem - o homem - é natureza" (Morin, 1974, p.19). Mais recentemente, a ciência concebeu a noção de ecossistema, no qual uma comunidade de seres vivos num espaço constitui uma unidade global. Dessa maneira, é possível considerar a Natureza um organismo global, onde o homem está inserido e faz parte de seus sistemas de restrições, interações e interdependências. Morin (1974) afirma que a dependência/independência ecológica do homem se encontra em dois graus sobrepostos e interdependentes, que são o do ecossistema social e o do ecossistema natural.

Buscando ligações mais claras da origem do homem com a natureza, pesquisadores do Instituto Médico Howard Hughes e do Hospital Geral de Massachusetts, em Boston, encontraram indícios de que a vida teria surgido na argila. Segundo o estudo, a montmorilonita (um dos tipos de argila, formado basicamente por camadas de sílica, SiO_2 , e hidróxido de alumínio $\text{Al}_2(\text{OH})_3$), participa da formação de depósitos gordurosos e ajuda as células a compor o material genético chamado RNA (ácido ribonucleico), indispensável para a origem da vida. A argila pode ser o catalisador das reações químicas para a criação do RNA a partir dos nucleotídeos (Hanczyc *et al*, 2003).

Em um estudo mais recente, na mesma linha de pesquisa, um grupo liderado por pesquisadores da Universidade de Cornell (EUA) descobriu que algumas argilas formam um hidrogel que possui microporos capazes de absorver líquidos e inchar, sem se dissolver. Esses pequenos espaços proporcionam a proteção adequada para facilitar processos químicos complexos, permitindo a síntese de proteínas, DNA, até que as primeiras membranas celulares começaram a se formar (Yang *et al*, 2013).

A intuição de que a vida e o homem foram gerados a partir da terra não é nova. Na mitologia grega e romana, pilares da cultura ocidental, encontra-se a origem do homem nos diversos poemas épicos. O poeta Hesíodo (~ 750-650 a.C.) conta que após Prometeu roubar o

fogo celeste e entregar aos mortais, Zeus, irado, dá aos homens uma mulher (Pandora), e com ela, o fim da criação dos homens pelos deuses, agora pela procriação sexuada:

Disse assim e gargalhou o pai dos homens e dos deuses;
ordenou então ao ínclito Hefesto muito velozmente
terra à água misturar e aí pôr humana voz e
força, e assemelhar de rosto às deusas imortais
esta bela e deleitável forma de virgem. (Hesíodo, 1996, p. 27, v.59 - 63)

Bulfinch (2006, p. 23), um dos autores mais respeitados em assuntos mitológicos, cita uma versão diferente. Após um deus separar o ar das águas e da terra e depois de criar todos os animais, necessitou de "um animal mais nobre, e foi feito o Homem. Prometeu tomou um pouco dessa terra e, misturando-a com água, fez o homem à semelhança dos deuses".

A memória genética da criação da humanidade a partir da terra também se mostra nos livros sagrados das religiões judaico-cristãs e islâmicas. No primeiro livro da Bíblia Sagrada, a Gênese, Deus criou o homem no sexto dia e o mandou povoar toda a terra: "Então, formou o Senhor Deus ao homem do pó da terra, e soprou em suas narinas o fôlego da vida, e o homem passou a ser alma vivente." (Bíblia, Gênese 2:7, 1993, p. 3).

Segundo o livro sagrado islâmico, o Alcorão, o homem (Adão) foi criado a partir de uma porção de barro contendo todas as suas variedades na Terra. Anjos foram mandados por Deus a todos os locais para coletar os punhados de terra, e assim os descendentes de Adão teriam aparências, atributos e qualidades diferentes. "Recorda-te de quando o teu Senhor disse aos anjos: 'De barro criarei um homem. Quando o tiver plasmado e alentado com o Meu Espírito, prostrai-vos ante ele.'" (Alcorão, 2010, 38:71-72). Em outra passagem, o Alcorão refere-se à Lúcifer, que, se negando reverenciar a criação divina, é expulso do Paraíso:

Todos os anjos se prostraram. Menos Lúcifer, que se negou a ser um dos prostrados. Disse (o Senhor): Ó Lúcifer, que foi que te impediu de seres um dos prostrados? Respondeu: 'É inadmissível que me prostre ante um ser que criaste de argila, de barro modelável.' Disse (o Senhor): 'Vai-te daqui (do Paraíso), porque és maldito! E a maldição pesará sobre ti até o Dia do Juízo.' (ALCORÃO, 2010 15:30-35).

Os primeiros abrigos do homem para se proteger foram os naturalmente construídos (cavernas) e os construídos com materiais naturais disponíveis localmente, como folhas, madeira, pedras e a própria terra. Construções foram edificadas com terra em quase todas as civilizações passadas e estiveram em todos os continentes do planeta. Desde as primeiras civilizações, entre o Nilo, o Tigre e o Eufrates, a terra é, ainda hoje, um dos principais materiais de construção utilizados para edificar casas e edifícios, tanto na zona rural quanto nas cidades (Houben e Guillaud, 1995). Segundo Neves e Faria (2011), a transmissão do conhecimento popular e tradicional, geração após geração, das técnicas de construção que utilizam a terra como matéria-prima, modificou-as e as fez evoluir. Invasões territoriais e colonizações também possibilitaram transferências de tecnologia, gerando novas e variadas combinações das formas de execução das técnicas construtivas.

Na arquitetura, Pallasmaa (2011, p. 30) afirma que os materiais de construção atuais não reforçam o senso de materialidade, essencial para o conforto enquanto proteção; já os materiais naturais "deixam que nossa visão penetre em suas superfícies e permitem que nos convençamos da veracidade da matéria". O autor lembra, ainda, de outro fator de ligação do homem com a natureza: a temporalidade (Figura 4.4). Os materiais naturais contam sua origem e seu uso histórico pelo homem, além de expressar história e idade.

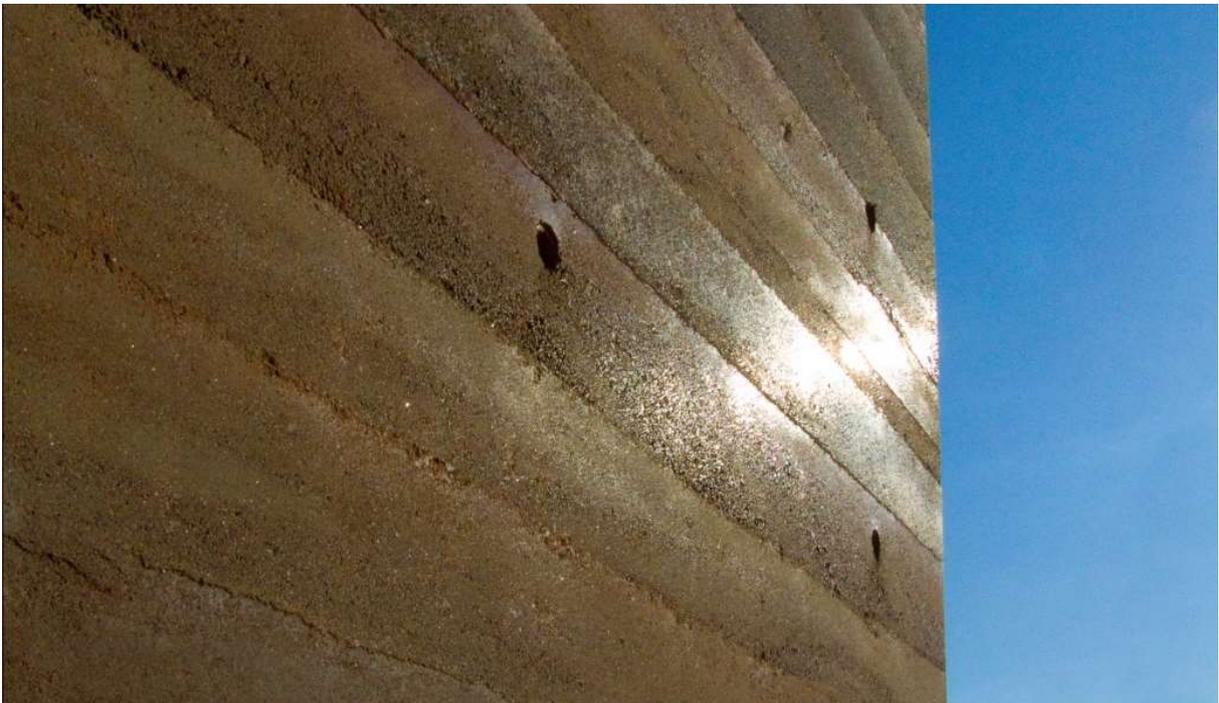


Figura 4.4 - Parede em técnica de taipa de pilão numa casa em São Paulo. Suas camadas simulam os horizontes do solo, formados pelo intemperismo secular. Fonte: arquivo do autor.

4.3 DIMENSÃO PSICOLÓGICA

A psicologia ambiental, como ensina Morata e Pol (2005), aborda as ligações entre as pessoas e os espaços, como uma construção social dos lugares, e destaca como principais conceitos o espaço, a identidade e o apego simbólico do lugar. Conforme afirma Schmid (2005, p. 28), "os contextos psico-espiritual e sociocultural estão intrinsecamente ligados à expectativa que as pessoas normalmente têm de uma edificação". A terra como material de construção natural traz o homem de volta às origens: na natureza (a Mãe Terra - útero), na origem sagrada (mitologia, religiosidade) e na origem científica (argila como formação dos primeiros indícios de vida). Ainda segundo Schmid (2008, p. 111), "as emoções funcionam como chaves de memória".

A percepção do espaço é atingida através dos estímulos sensoriais. Merleau-Ponty (2006) afirma que essa percepção dos espaços não é percebida pelos sentidos separadamente, mas sim em seu conjunto (estímulos materiais), e esses são influenciados pelas experiências passadas e expectativas ou desejos futuros (estímulos imateriais). Assim, o tato percebe a textura da terra, o olfato o cheiro dela e a liga à memória. Os sons são reverberados nas superfícies das construções naturais de maneira diferente das outras. "Nunca vivo inteiramente nos espaços antropológicos, estou sempre ligado, por minha raízes, a um espaço natural e inumano." (Merleau-Ponty, 2006, p. 393)

A apropriação - entendida aqui como interiorização da prática humana - do espaço é atingida através de duas principais vias complementares: a *ação-transformação* e a *identificação simbólica*. Segundo Morata e Pol (2005), a primeira relaciona territorialidade e espaço pessoal ao considerar a apropriação com um conceito subsidiário da territorialidade. A identificação simbólica é vinculada com processos afetivos, cognitivos e interativos. A apropriação do espaço é um processo dialético no qual se vinculam as pessoas e os espaços, dentro de um contexto sociocultural. Sendo a apropriação do espaço uma relação interdependente e recíproca, do homem e do objeto (a edificação), quando o homem não se identifica com o objeto, este último se aliena; somente há apropriação quando existe identificação.

Na aldeia de Tera, na África, a cerimônia de casamento inclui a construção da casa do novo casal. O ancião escolhe a localização da edificação e toda a comunidade participa da construção, das crianças até os mais velhos (Katigura Y Aganachi, 2014). Desde a manufatura

dos adobes, seu assentamento, passando pelo revestimento das paredes até o acabamento, cada pessoa da tribo executa uma tarefa, cantando e abençoando o novo casal (Figura 4.5). Essa é a fase *ação-transformação*. A *identificação simbólica* entre o casal e a casa (e entre as pessoas da tribo e a aldeia) está vinculada à gratidão pelo presente (a edificação) e pelo simbolismo das formas desenhadas e esculpidas nas paredes que simbolizam proteção. A apropriação do espaço acontece em duas escalas: na casa, pelo novo casal, e na aldeia, por toda a comunidade.



Figura 4.5 - As mulheres da aldeia de Tera rebocam e pintam as paredes da casa do novo casal Katigura e Aganachi, em sua cerimônia de casamento. Fonte: Katigura y Aganachi, 2014.

O arquiteto argentino Jorge Belanko afirma que a família deveria construir sua própria casa (El Barro, 2006), demonstrando o significado simbólico de participar da edificação da morada, estreitando os laços afetivos com a casa desde o momento inicial. Nesse sentido, a apropriação do espaço é atingida pelas duas vias citadas por Morata e Pol (2005): na *ação-transformação* enquanto elemento modificador da terra em parede (construtor) e na *identificação simbólica*, processo de interação entre o objeto com a pessoa que cria o vínculo cognitivo e emocional.

4.4 DIMENSÃO ESPACIAL

Nesta etapa, o conforto será tratado enquanto reduto do descanso, do devaneio; a ideia de conforto será ligada ao sonho e à imaginação. Com a necessidade de abrigo, de acolhimento, de segurança, o homem construiu sua habitação: "a casa acolhe, atende a um conjunto de necessidades básicas de segurança, envolvimento, orientação no tempo e principalmente, no espaço." (Schmid, 2005, p.13).

A habitação é o lugar onde se pode melhor entender o significado do conforto. É nela que se encontra o lugar seguro, de acolhimento, de abrigo. "A casa é o nosso canto do mundo. Trata-se – como muitas vezes é dito – o nosso primeiro universo." (Bachelard, 1965, p. 34). Ela é a primeira referência espacial fora do útero materno. Esse último é o local de maior proteção já desfrutada pelo homem e que permanece em seu inconsciente no ideal de conforto.

Na casa, o conceito de conforto assume vários significados, desde as necessidades de segurança, prazer, privacidade e proteção por ali estar, mesmo quando uma tempestade se aproxima. "A ideia de estar acolhido enfatiza o elemento protetor do conforto" afirma Schmid (2005, p. 29). A simples expectativa de voltar para casa depois de um dia de trabalho conforta e anima. "É como se oferecesse consolo interminável ao ser humano, lançado no mundo" diz Schmid (2005, p.13). Pallasmaa (2011, p.55), citando Bachelard, escreve que somente aqueles que aprenderam a aconchegar-se conseguem "habitar com intensidade".

Ao chegar à habitação e fechar a porta, abre-se uma dimensão completamente diferente daquela que se deu as costas. É como estar num outro mundo, num mundo natural feito pelo habitante. A casa, diferente do trabalho ou da cidade como um todo, traz a sensação de segurança e bem-estar. A cidade não é percebida como um elemento natural, mas sim um elemento construído pelo homem. Spirn (1995, p. 21) fala sobre a natureza da cidade: "a crença de que a cidade é uma entidade separada da natureza, e até contrária a ela, dominou a maneira como a cidade é percebida e continua a afetar o modo como ela é construída". Ao contrário da rua, dentro da casa é possível usufruir do prazer de fazer o que quiser, sem preocupações de julgamentos alheios. Schmid (2005, p. 33) cita a "privacidade como uma das primeiras exigências do conforto", nos Países Baixos do século XVII.

Fora dos abrigos naturais e "tocas", o homem construiu sua habitação com os materiais que tinha à mão: terra, pedra, madeira, palha, folhas etc. Geração após geração, as técnicas de construção foram se aprimorando, novas tecnologias foram desenvolvidas e a habitação mantinha e reforçava seu conceito de conforto enquanto proteção das intempéries, segurança, privacidade. Porém, as edificações que utilizam materiais "modernos" não possuem o mesmo conceito de materialidade e temporalidade descrito acima. Segundo Bloomer e Moore, citados por Pallasmaa (2011, p. 38), as habitações atuais não possuem "as transações potenciais entre corpo, imaginação e ambiente".

As proporções do corpo humano orientam as construções das culturas tradicionais e a arquitetura vernacular, especialmente aquelas feitas com terra. Segundo Pallasmaa (2011, p. 25) "as obras de arquitetura autóctones em argila e barro, de várias partes do mundo, parecem nascer dos sentidos musculares e táteis, mais do que dos olhos". Uma habitação de terra torna-se confortável e aconchegante ao proporcionar ao usuário a sensação de construção feita por mãos humanas, quase como um artesanato. Exemplo marcante dessa arquitetura são as casas obuses da tribo Musgum, etnia do norte de Camarões, que utilizando a técnica de terra esculpida ou modelada realiza através da manipulação direta da matéria-prima em estado plástico, sem a utilização de formas ou equipamentos (Figura 4.6). As edificações são construídas com as mãos nuas ou com ferramentas simples e revelam a beleza das formas arquitetônicas e acabamentos (Houben & Guillaud, 1991).

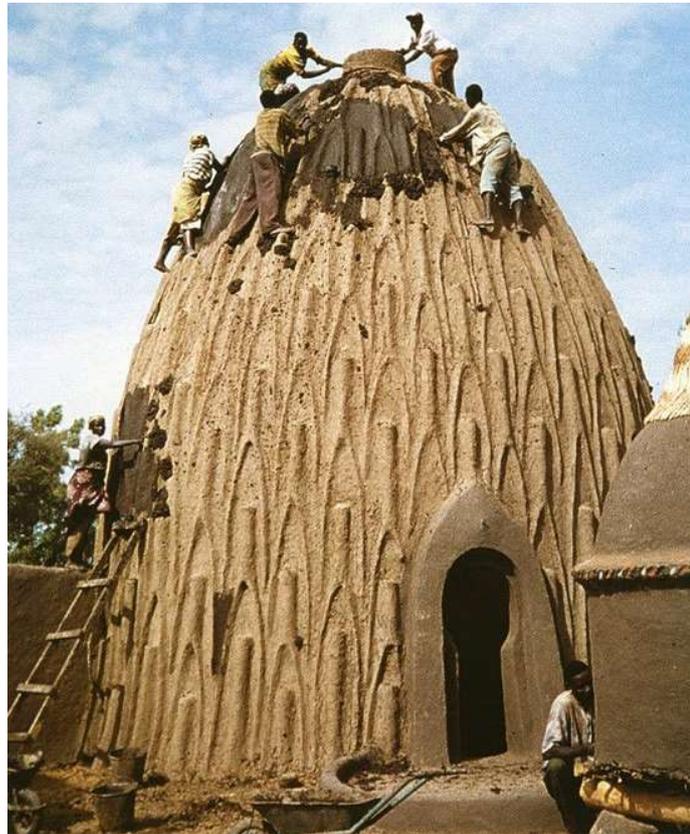


Figura 4.6 - Construção de uma casa obuse, no norte de Camarões. Fonte: site Architecturas de terra

5 ESPAÇO ARQUITETÔNICO CONTEMPORÂNEO CONSTRUÍDO COM TERRA

Habitar, para Norberg-Shulz (2008), refere-se às relações entre o homem e o lugar e depende de três funções do lugar construído para se relacionar com a natureza: visualizar a natureza a seu modo, construído numa expressão conquistadora dela; simbolizar, traduzindo de outro modo o que experimentou; e reunir, juntando os significados e transpondo os sentidos para o lugar. O autor analisa por duas categorias a estrutura do lugar: *espaço*, organização geométrica dos elementos formadores do lugar, abstrato, e *caráter*, propriedade mais abrangente do lugar, “atmosfera” geral do lugar. Quando habita, o homem está ao mesmo tempo localizado no espaço e submetido a um certo caráter ambiental, ou seja, ele orienta-se no espaço e identifica-se com o ambiente.

O espaço construído deve ser mais do que o vazio existente entre paredes, ele deve permitir “a incessante profusão de efeitos especiais que afetam a consciência do tempo e das distâncias, assim como a percepção do meio” (Virilio, 1993, p.16). A criação desse espaço, construído com terra, deve estimular os sentidos perceptivos e os demais sentidos humanos, além de alimentar o caráter simbólico que ele representa aos seus ocupantes. O arquiteto deve compreender e interpretar o material a ser empregado, “harmonizá-lo e realçar as qualidades formais e simbólicas” (Okamoto, 2014, p.129).

A arquitetura vernacular e tradicional desenvolveu-se, em conjunto com as técnicas (tecnologia apropriada), através do tempo. Por meio da tentativa e erro, a intuição dos construtores criou espaços que respeitam e se aproveitam do clima e materiais locais para garantir o conforto necessário aos ocupantes desse espaço.

É possível um caminho que, ao lado da inovação tecnológica, a arquitetura contemporânea renove a estética, a expressão e a imaginação da arquitetura vernacular, e que elimine os preconceitos de ultrapassada e de miséria das construções de terra?

A arquitetura vernácula fornece uma série de conceitos que podem integrar-se no processo projetual da arquitetura contemporânea, com uma perspectiva holística e sustentável. Esses conceitos não são novos nem inovadores: a boa arquitetura sempre se utilizou deles, com nomes diferentes e em contextos diferentes. Nessa perspectiva, o projeto VerSus, que envolve universidades de Portugal, Espanha, Itália e França, desenvolveu

metodologia para avaliar a arquitetura contemporânea com os princípios da arquitetura vernacular, verificar se as estratégias são espelhadas em novos edifícios e auxiliar no processo projetual de outros (Correia *et al*, 2014). Esses parâmetros foram divididos nos três âmbitos do que se chama atualmente “sustentabilidade” (os mesmos princípios eram utilizados na arquitetura vernacular sem essa nomenclatura): ambiental, sociocultural e socioeconômico, e totalizam 15 princípios ou estratégias de projeto (Figura 5.1). Essas estratégias conceituais e projetuais podem ajudar a responder àquela pergunta.



Figura 5.1: Princípios estratégicos divididos nos três âmbitos da sustentabilidade. Fonte: Correia *et al*, 2014.

A analogia dos conceitos da arquitetura vernácula, transportados para um desenho contemporâneo, deve respeitar a cultura construtiva local e, por meio das tecnologias apropriadas, atualizar os sistemas que mantêm (e até reforçam) o simbolismo desse espaço, oferecendo bem estar aos ocupantes (conforto físico e mental). As construções atuais de terra devem respeitar as técnicas tradicionais e a regionalidade e, de forma criativa, inovar os sistemas construtivos e o desenho das edificações para a contemporaneidade. “O mesmo material e suas técnicas locais também podem ser a ligação entre tradição e modernidade. A tradição se reflete nos recursos e tradições locais e a contemporaneidade na reinvenção/reinterpretação deles” (Marchante e Cortés, 2010, p.78).

Umberto Eco explica essa relação do passado com a inovação para o futuro:

a atividade lúdica de redescobrir significados para as coisas, ao invés de exercitar-nos numa fácil filologia em relação ao passado, implica uma invenção (não uma redescoberta) de códigos novos. O salto para trás transforma-se em salto para a frente. A história, de ilusão cíclica, passa a ser projeção do futuro. (ECO, 1974, p.214)

A arquitetura contemporânea de terra apareceu na década de 1980 em vários locais do mundo, após uma lacuna de seu desenvolvimento e que ficou relegada à construções precárias. Europa, Américas e Oceânia apresentam edificações de qualidade estética e tecnológica e que encantam com sua linguagem atual e incentivam estudantes e profissionais a realizar mais pesquisas a esse respeito.

Num primeiro momento, essa “nova” arquitetura pretendeu se afirmar pelo restauro e recuperação do patrimônio histórico existente. Após serem assimiladas as referências culturais e técnicas construtivas, “abriu-se o caminho para uma geração de obras novas onde é bem visível uma forte preocupação de entendimento e pesquisa de valores plásticos, estéticos e programáticos” (Jorge, 2010, p.2). A quantidade de exemplos de arquiteturas de terra contemporâneas apontam um crescimento de sua procura, principalmente habitações unifamiliares de classe média, que migram para áreas menos urbanizadas à procura de maior tranquilidade (Jorge, 2010; Bayer, 2010).

As construções vernaculares locais respeitavam o conforto e a salubridade, sem exagero no uso de vidros e concreto, com largos beirais propícios ao clima tropical, proteção contra a forte radiação, ventilação natural etc. A busca por uma arquitetura de qualidade, confortável e saudável, encontra na terra um material de construção com condições de alcançar resultados e soluções que satisfaçam os usuários e com impacto ambiental consideravelmente menor.

Nas palavras do arquiteto Ricardo Junqueira Piva, projetista e construtor de edificações de terra:

A preocupação é como aliar essa nova consciência [menor impacto ambiental] a um desenho contemporâneo e responsável, unindo

conhecimentos vernaculares de comprovada eficiência com as conquistas espaciais da arquitetura moderna, dentro da realidade social, econômica, ambiental e tecnológica do Brasil. (Piva, 2006, p.1).

A arquitetura contemporânea de terra busca no desenho (forma) soluções para o espaço que sejam econômicas, de baixo impacto ambiental e que contenham as referências históricas locais e estéticas. Como exemplo, as *bóvedas mexicanas* (abóbadas mexicanas), executadas com adobes ou BTC, e que derivam da lógica construtiva das abóbadas núbias (Aguirre, 2011). As coberturas em abóbadas mexicanas apropriam-se da tradição por sua simplicidade construtiva, são autoportantes e não necessitam de escoras (sua conformação exige somente a resistência à compressão). É uma solução econômica, simples, de fácil treinamento e execução e de grande valor estético e histórico (Figura 5.2).



Figura 5.2: Processo construtivo da abóbada. Fotos: Ramón Aguirre.

Outro exemplo de construção que utiliza abóbadas é a produzida pelo arquiteto paraguaio Ramiro Meyer a partir do redesenho das estruturas elaboradas por Félix Candela.

Utilizando BTC produzido com terra do local, o pavilhão de 90m² cobertos e sem uso predeterminado, o arquiteto desenvolveu formas metálicas que funcionam como guias para a construção das abóbodas com a curva catenária (Figura 5.3). Sobre os blocos assentados, é executada uma camada fina de concreto com tela metálica (do tipo tela de galinheiro) e o impermeabilizante (Franco, 2014). As sequências de arcos lembram as obras do arquiteto uruguaio Eladio Dieste, porém com sistema construtivo diferente, uma vez que não utiliza alvenaria armada.

Pela sua forma, estrutura do pavilhão é submetida a esforços de compressão pura, o que permite a utilização de blocos de terra e de reduzida espessura. A intenção é que o pavilhão seja replicado pela zona rural daquele país, construído com um sistema de fácil apropriação pelos usuários, abrigando locais de reunião dos moradores da região, salas de aulas ou demais atividades possíveis num espaço com dimensões de 10x9m de superfície e 5,5m de altura.



Figura 5.3: Pavilhão experimental projetado e construído pelo arquiteto Ramiro Meyer, em Lambaré, Paraguay. Fotos: Federico Caioli.

A inovação espacial parece possível somente após uma profunda compreensão do material a ser trabalhado, suas qualidades e desvantagens, suas características mecânicas, físicas e visuais, bem como as técnicas que podem ser geradas a partir do material. Essa manipulação criativa se aproveita das vantagens do material até o limite e, na busca da eficiência, melhor desempenho e um desenho contemporâneo, insere outros materiais com características que eliminem as deficiências do primeiro. A terra pode trabalhar em conjunto com quase todos os materiais para suprimir suas desvantagens, especialmente os materiais naturais e locais.

Com o conceito dos sistemas mistos, Arini e Nascimento (2006) apresentaram um condomínio habitacional construído em BTC e estrutura metálica, que mostra a possibilidade e as vantagens do uso de técnicas e sistemas diversos, aproveitando as vantagens de cada um. Os BTC foram produzidos em diferentes formatos (Figura 5.4), tanto para os fechamentos de alvenaria (blocos de base dos vedos, topo dos vedos e blocos “tipo”) quanto para a cobertura (bloco trapezoidal maciço para formar o arco abatido) e pisos (bloco maciço regular).

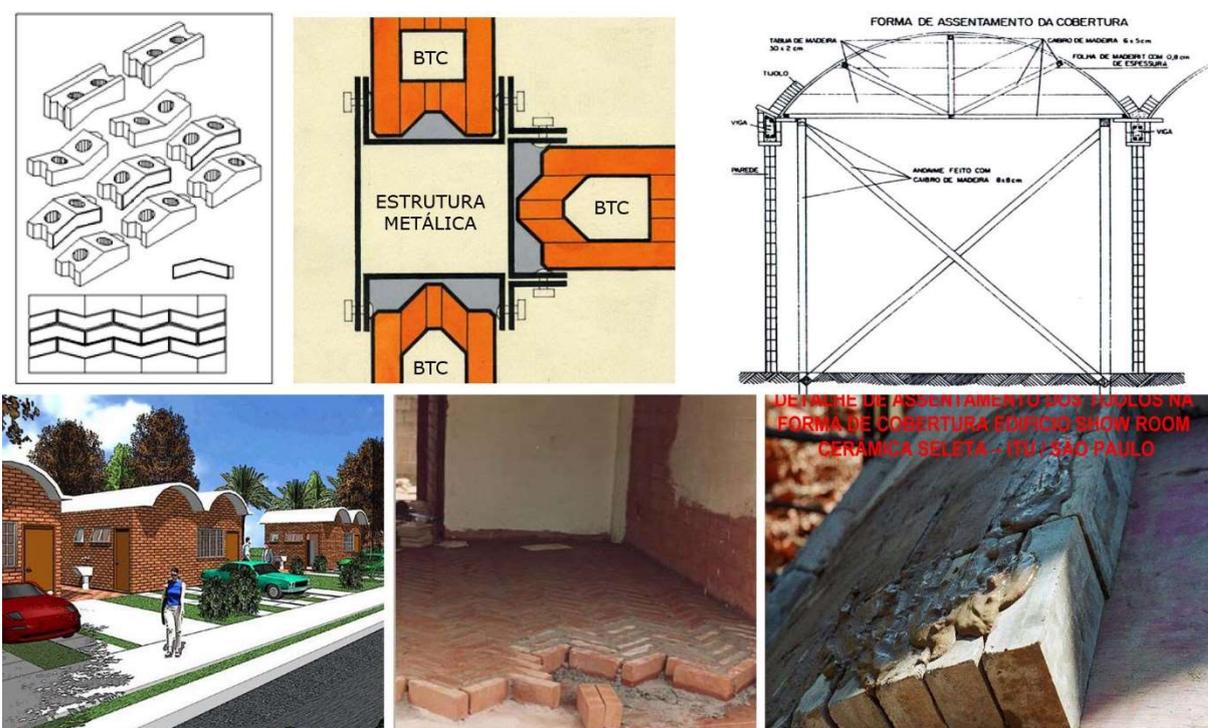


Figura 5.4: Desenhos, fotos e perspectiva do condomínio residencial em Guarulhos (SP). Os blocos de terra comprimida foram fabricados em diversos formatos e tem função de vedação; a estrutura metálica no encontro das paredes sustenta os arcos de cobertura construídos também com os BTC.

Fonte: arquivo Ruy Arini.

Apesar de não utilizar as técnicas de terra compactada ou comprimida (temas dessa dissertação), o arquiteto chileno Patricio Arias Cortés (2010) desenvolveu uma tecnologia que mistura terra, palha e aço, chamando-a de *tecno-barro* ou *quincha metálica* (Figura 5.5). Essa técnica aproveita as vantagens da terra (compressão) e aço (tração), além de vantagens da pré-fabricação (rápida montagem, maior controle na fabricação etc.). A técnica é baseada no pau-a-pique (*quincha*) e tem sua contemporaneidade demonstrada no processo/sistema construtivo (pré-fabricação de elementos metálicos) e nos espaços projetados. Esse é mais um exemplo de inovação tecnológica que respeita e se referencia na tradição construtiva local e atualiza a técnica e os espaços.



Figura 5.5: Residências projetadas e construídas pelo arquiteto chileno Patricio Arias Cortés (Surtierra), utilizando a técnica do tecno-barro. Casa Munita Gozalez (superior) e Casa Pirque (inferior). Fotos: site Sur Tierra Arquitectura

Os arquitetos Fernando Minto e Rafael Oliveira projetaram o escritório administrativo de uma fazenda no município de Taquarivaí (SP), com toda a infraestrutura tecnológica exigida para seu funcionamento e mantendo a simbologia rural do contexto, integrando a edificação à paisagem (Figura 5.6). Os materiais e técnicas foram escolhidos com base no baixo impacto

ambiental, utilizando materiais naturais locais pouco processados; o resultado foi “fruto de um desenho racional e [que] busca eficiência energética e construtiva além de maior economia” (Minto, 2014, p.1). O partido arquitetônico se referenciou nas antigas sedes de fazenda do interior do estado e nas casas bandeiristas: além do desenho, a técnica de taipa de pilão também está presente nessa obra. Esses painéis, construídos com 45cm de espessura, exercem a função estrutural e garantem o conforto térmico na fachada Norte, uma vez que isolam a amplitude térmica e a alta radiação solar do exterior. Sobre eles, apoia-se a estrutura da cobertura em peças de madeira laminada colada, provenientes de plantações próximas e que podem ser produzidas com madeiras de menor densidade.



Figura 5.6: Escritório em fazenda em Taquaravaí (SP) - com painéis autoportantes em taipa de pilão e estrutura da cobertura em madeira laminada colada. Autores do projeto: Fernando Cesar Negrini Minto e Rafael Oliveira. Fotos: arquivo Fernando Cesar Negrini Minto.

Fica claro que a terra é um material construtivo que pode ser usado nos dias atuais, com projetos contemporâneos e inovações tecnológicas que lhe garantam melhor desempenho. A qualidade da edificação dependerá de como será utilizada a terra, de um projeto que contemple o clima local e as necessidades dos usuários, quais técnicas serão utilizadas, controle na execução e manutenção preventiva. O conforto ambiental deve ser especialmente oferecido em uma habitação construída com terra.

6 CONCLUSÃO

A terra foi um dos primeiros materiais que o homem aprendeu a modificar e utilizar na construção. Esse tipo de edificação constitui, portanto, num dos saberes mais antigos de conhecimentos relacionados com a forma de dominação do território. A preservação e desenvolvimento do uso deste material, por meio da tradição oral ao longo da história, permitiram sua adaptação ao longo do tempo e, hoje, faz parte do patrimônio cultural que identifica diversas culturas.

A edificação construída com esse material abundante em diversas regiões do planeta, a terra, oferece conforto aos seus ocupantes: conforto do corpo e da alma. Além das normas que regulam o "não desconforto" e do ensino puramente físico e térmico da academia, o conforto ambiental deve ser levado a outro patamar de estudo. A afirmação de Schmid deixa claro esse conceito: "a caracterização de conforto ambiental sob uma perspectiva holística inclui (...) a conveniência, o encanto e a leveza" (SCHMID, 2005, p. 37). E vai além quando cita o conforto superando a linha da neutralidade, no nível da transcendência, que "está inseparável do prazer, do êxtase, na extremidade oposta à do sofrimento, e aumenta sem limites aparentes. Talvez não se consiga mais quantificá-lo" (SCHMID, 2005, p. 30).

A pouca significação das construções convencionais atuais e o pouco estímulo ao corpo e aos sentidos humanos da arquitetura contemporânea, importada da Europa e Estados Unidos (que é praticamente visual), reforçam o conceito utilizado por Le Corbusier da "máquina de morar". Esse espaço é frio e utilitário, bastante neutro em relação às emoções humanas, habitado por "pessoas desconfortavelmente instaladas no que toca à satisfação estética dos sentidos, dentro de um ambiente geometricamente asséptico" (Schmid, 2005, p. 19). Ele faz referência explícita ao racionalismo, à masculinidade da indústria, oposta à característica feminina do lar que é carregada de apego às emoções e aos sentidos. Materiais de construção puramente industriais (pouco naturais) transmitem ao espaço a sensação de frieza, dureza e artificialidade. Para Duarte Jr. (2000, p.82), a máquina de morar trouxe "um espaço bem pouco expressivo e acolhedor, tornando-nos, em seu interior, pessoas desconfortavelmente instaladas no que toca à satisfação estética de nossos sentidos."

Outro anseio da sociedade contemporânea é a busca de tecnologias que possibilitem maior praticidade e velocidade à vida cotidiana. Quando não obtidas, tornam-se "um novo

elemento passível de suscitar irritação e descontentamento” (LIPOVETSKY, 2007, p.26). A arquitetura de terra contemporânea não busca retomar as práticas arcaicas de séculos passados, mas sim aprimorá-las e evoluí-las. O desenvolvimento de tecnologias voltadas à construção com terra é tema de diversos centros de pesquisa pelo mundo, que criam novos maquinários e equipamentos, sistematizam e industrializam processos, desenvolvem misturas de terra com outros materiais que diminuem os impactos negativos das construções e aumentam a eficiência na execução e a qualidade da habitação.

Le Corbusier afirmou que a arquitetura é para emocionar. A qualidade da edificação junto à capacidade de estímulos da terra podem proporcionar essa emoção: o conceito de conforto apreendido pelo usuário se expressa pelo prazer, pelo bem-estar, pelo consolo do espírito, pela expansão de seu corpo e cultura e expansão de suas emoções e sentimentos. Nas palavras de Pallasmaa (2011, p. 11), "a arquitetura significativa faz com que nos sintamos como seres corpóreos e espiritualizados".

A apropriação do espaço da habitação é também vinculada à identificação simbólica entre o homem e a casa. Ela pode ocorrer quando o material – a terra - conta sua origem (dele e do homem) e pela afeição ao objeto-casa construído de uma forma significativa aos ocupantes, seja pela participação nos processos de projeto e construção, seja pelo uso de tecnologias que lhes agradem.

A terra - enquanto material de construção em si - não torna uma habitação confortável; é o espaço que tem essa responsabilidade. O material pode alimentar estímulos sensoriais que enriqueçam o espaço e o permitam reforçar a percepção de acolhimento, privacidade, prazer, segurança, humanidade.

Assim como os sentidos estão interconectados, memória, percepção, corpo físico e psíquico também estão e experimentam as sensações das dimensões acima descritas juntas e ao mesmo tempo. “As propriedades sensoriais de uma coisa constituem em conjunto uma mesma coisa, assim como meu olhar, meu tato e todos os meus outros sentidos são em conjunto as potências de um mesmo corpo integradas em uma só ação.” (Merleau-Ponty, 2006, p. 426).

O estudo do conforto ambiental, em especial o térmico, precisa abranger mais que a exatidão e abstração das simulações e medições; precisa ir além das descrições limitadas e aproximadas de uma realidade que “deixa de acreditar em nossos próprios olhos para crer tão

facilmente nos vetores da representação eletrônica” (Virilio, 1993, p.31). É preciso dar um passo atrás para poder observar a perspectiva de forma mais completa: verificar se a ciência não está se desenvolvendo e inovando por ela mesma (a ciência pela ciência) e inserir o usuário nesse quadro, com todos os seus anseios, necessidades e vontades. O método científico, que ainda hoje é cartesiano e mecanicista, fragmenta as disciplinas e especializa o conhecimento, deverá compreender a visão de uma realidade sistêmica, holística, que insere a intuição e a percepção dos indivíduos.

Avaliar o conforto de uma edificação ou cidade de maneira sistêmica é incluir um elemento extremamente complexo à equação e que não pode ser deixado em segundo plano: o ser humano. Os Modelos Adaptativos de conforto térmico (de Dear e Brager, 1998; Nicol e Humphreys, 2002; ASHRAE 55, 2010) incorporam à avaliação parte dessa complexidade, como a aclimação, adaptação genética, expectativa e a memória térmica além do controle personalizado do ambiente. Pesquisas que relacionam os diversos campos do conforto ambiental de forma quantitativa (térmico, luminoso, acústico, qualidade do ar, ergonomia) devem incluir pesquisas qualitativas (cultural, econômica, social e psicológica). Uma metodologia para avaliar o conforto com viés sistêmico deve basear-se na dependência da ação e da interação das relações entre os indivíduos, a cultura, os espaços e as memórias/expectativas.

Por muitos séculos, a terra foi utilizada na construção essencialmente pela necessidade de abrigo e falta de outros materiais. É um material de construção de uso milenar, com inúmeras vantagens e que deve ser pesquisado e utilizado com seriedade, cientificismo e sensibilidade que exige no processo projetual. Seu uso na arquitetura contemporânea é uma opção e não deve ser tratada como “alternativa”, com a conotação de falta de possibilidade de escolha. Esse material pode ser utilizado de maneira sofisticada e inventiva, incorporando inovações em todos os processos de seu uso, desde que não se perca em fetichismo ou modismo e nem encarado como panaceia para a sustentabilidade.

Como reforça Taveira (1987, p. 8), o uso atual da terra como material de construção deve "considerar a possibilidade de evolução tecnológica, como algo novo, moderno e prático". As inovações tecnológicas devem ser incorporadas e evoluídas nos processos, de maneira ampla, na busca do maior desempenho da técnica e assim, torná-la técnica e economicamente mais viável e acessível.

A crescente preocupação em evitar a degradação ambiental encontra descanso no uso de materiais de construção como a terra. Esse material permite seu reuso ininterruptamente, em novas formas, novas edificações e construído com diferentes técnicas. A terra provoca baixíssimo impacto ambiental comparado com os materiais convencionais e pode ser reutilizado ilimitadamente, especialmente quando o material é o do local: não há necessidade de gasto de energia em grandes transportes e a interação da edificação com o entorno fica mais evidente.

Mesmo estabilizada com algum aglomerante, sua reciclagem é possível devido à pouca porcentagem agregada; e no caso do “descarte”, a deposição do material na natureza não provoca nenhum prejuízo ambiental, uma vez que o material volta a estar no lugar de onde fora retirado, volta a ser incorporado a sua origem, num ciclo “do berço ao berço”.

O conforto ambiental possibilitado pela habitação de terra, por meio de um projeto aderente às características deste material e ao clima local, pode suprir as necessidades térmicas e promover, além do “não desconforto”, o prazer aos seus ocupantes.

6.1 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Recomenda-se para pesquisas futuras os seguintes temas:

- pesquisar e analisar as edificações contemporâneas construídas com terra no Brasil;
- desenvolver metodologia para avaliar o conforto ambiental dos ocupantes com viés sistêmico;
- pesquisar e desenvolver inovações tecnológicas relacionadas à construção com terra.

REFERÊNCIAS

ArchDaily. **Nk'Mip Desert Cultural Centre - HBBH Architects / HBBH Architects**. Publicado em 23/12/2008. Acessado em 10/12/2015. <http://www.archdaily.com/10629/nkmip-desert-cultural-centre-hbbh-architects/>

ArchDaily. **The School of Visual Arts of Oaxaca / Taller de Arquitectura-Mauricio Rocha**. Publicado em 29/07/2011. Acessado em 10/12/2015 <<http://www.archdaily.com/154485/the-school-of-visual-arts-of-oaxaca-taller-de-arquitectura-mauricio-rocha/>>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO ORTLAND — ABCP. **Construção de paredes monolíticas com solo-cimento compactado**. 3.ed.rev.atual. São Paulo: ABCP, 1998. 16p. (BT-110)

_____. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. 3.ed.rev.atual. São Paulo: ABCP, 2000. 16p. (BT-111)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS — ABNT. **NBR 6502 - Rochas e solos - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 8491 - Tijolo de solo-cimento** — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR 10833 - Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica**. Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 10834 - Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural**. Rio de Janeiro, 2012c.

_____. **NBR 13553 Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural**. Rio de Janeiro, 2012d.

_____. **NBR 15220: desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220:1 Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABIKO, Alex Kenya. **Tecnologias apropriadas tijolos e paredes monolíticas de solo-cimento**. Dissertação para obtenção de título de Mestre. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1980. 115 p.

AGUIRRE, Ramón. Abóbada de Terra. In: **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 26-34. Disponível em <<http://www.redproterra.org>>. Acessado em 14/08/2013.

ALCORÃO. **Alcorão: livro sagrado do islã**. Rio de Janeiro: Edições de bolso, 2010. 490p.

ALLINSON, David; HALL, Matthew. Humidity buffering using stabilized rammed earth materials. In: **Proceedings of the ICE: Construction materials**, 165 (CM6), 335-344, 2012.

ARINI, Ruy. Del Carlo, Ualfrido (orient). **Arquitetura de terra solo/cimento/cal**. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, 1999. 287 p.

ARINI, Ruy; NASCIMENTO, Renato. Arquitetura de terra: projeto e construção de condomínio habitacional. In **III Seminário de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil e IV Seminário Arquitectura de Terra em Portugal**. Anais. Ouro Preto, MG: Rede PROTERRA / UFMG, 2006. CD-ROM. p. 1-11.

ASHRAE 55. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York, 2013.

ASSIS, João B. S.; CHAHUD, Eduardo; ASSIS, Paulo S. Compressão excêntrica em paredes construídas com blocos intertravados de solo-cimento. In: **VIII Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra, VIII SIACOT**. Anais. Tucumán, Argentina: Universidad Nacional de Tucumán, 2009. p. 178-187.

_____. Flexão em paredes construídas com blocos de solo-cimento, intertravados, sob carga horizontal uniformemente distribuída. In: **III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2010**. Anais. Campo Grande: Rede TerraBrasil / UFMS, 2010. CD-ROM. p. 1-10.

BACHELARD, G. **La poética del espacio**. México D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1965. 281p.

BARBOSA, Normando P.; TIMÓTEO, Soênia M.; MATTONE, Roberto; PASERO, Gloria. Avaliação pós-ocupação de construções de blocos de terra comprimida tipo Mattone In: **VII Seminário Ibero-americano de Construção com Terra e III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil TERRA BRASIL 2008**. Anais. São Luís, MA: Rede PROTERRA / UEM, 2008. CD-ROM. p. 1-10.

BAYER, Ana Paula. Arquitetura em terra no uruguai: modelo de desenvolvimento. In: **III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2010**. Anais. Campo Grande: Rede TerraBrasil / UFMS, 2010. CD-ROM. p. 1-11.

BÍBLIA. **A Bíblia Sagrada**. Tradução de João Ferreira de Almeida. 2ª ed. Barueri - SP: Sociedade Bíblica do Brasil, 1993.

BULFINCH, T. **O livro de ouro da mitologia: histórias de deuses e heróis**. Tradução de David Jardim. 34 ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2006. 355p.

BURROUGHS, S. Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization. **Journal of Materials In Civil Engineering**, 2008. pp.265-273.

BUSON, Márcio; VARUM, Humberto; SPOSTO, Rosa M. Fibras dispersas de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para a produção e assentamento de BTCs. In: **III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2010**. Anais. Campo Grande: Rede TerraBrasil / UFMS, 2010. CD-ROM. p. 1-10.

CRATerre – Centre International de la Construction en Terre. **Construire en terre**. Paris: CRATerre, 1979. 270 p.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. THABA. CEPED. **Manual de construção com solo-cimento**. Convênio: CEPED/ BNH/ URBIS/ CONDER/ PMC/OEA/ CEBRACE/ABCP. São Paulo: ABCP, 1984.

CORREIA, Mariana; GÓMES, Filipa; CARLOS, Gilberto D.; CORREIA, João. Reflexões do projeto versus contributo do patrimônio vernáculo para a arquitetura contemporânea sustentável. In: **14º Seminário Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, SIACOT**. Anais. San Salvador, El Salvador, Centroamerica, 2014. CD-ROM. p. 80-87.

CORTÉS, Patricio Arias. Innovación tecnológica de construcción en tierra In: **IV Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 6º ATP e IX Seminário Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 9º SIACOT**. Anais. Coimbra, Portugal: Escola Superior Gallaecia, 2010. CD-ROM. p. 1-8.

CRATerre – Centre International de la Construction en Terre. **Construire en terre**. Paris: CRATerre, 1979. 270 p.

DETHIER, Jean. **Arquitetura de Terra ou o Futuro de uma tradição Milenar**. Catálogo de exposição. Rio de Janeiro : Avenir, 1982. 208p.

De Dear, R.J. ; Brager, G.S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. In: **ASHRAE Transactions**, **104 (1a)**, 1998. p.145–167.

DUARTE JR., J. F. **O sentido dos sentidos: a educação (do) sensível**. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Educação, 2000. 234p.

ECO, Umberto. **A estrutura ausente**. 2ª ed. São Paulo: Editora Perspectiva S.A., 1974. 426p.

EL BARRO, LAS MANOS, LA CASA. Gustavo Marangon. Argentina: El Bolson Producciones, 2006. DVD (115 min).

FARIA, Obede. B.; BATTISTELLE, R. A. G.; NEVES, Célia. Avaliação preliminar da influência da adição de 'baba-de-cupim' em características físicas e mecânicas de solo-cimento compactado. In: **IV Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2012**. Anais. Fortaleza: Rede TerraBrasil / UFC, 2012. CD-ROM. p. 1-11.

FAY, Liliana; CEPPAS, Kristian P. Estudo da viabilidade da fabricação de blocos de solo-cimento para a construção de alvenarias com a intenção de eliminar a argamassa de assentamento In: **IV Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2012**. Anais. Fortaleza: Rede TerraBrasil / UFC, 2012. CD-ROM. p. 1-10.

FERNANDES, Maria. Técnicas de construção em terra. In: **Terra: formas de construir, arquitectura, antropología e arqueología**. Lisboa: Ed. Argumentum, 2006.

FERREIRA, Regis Castro. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e painéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. 2003. Tese para obtenção de título de doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. 204p.

FRANCO, José T. **Catenarius: uma abóbada experimental de tijolos de solo-cimento**. ArchDaily Brasil. Publicado em 01 dez 2014. Disponível em: <www.archdaily.com.br/br/758150/catenarius-uma-abobada-experimental-de-tijolos-de-solo-cimento>. Acessado em 10 dez 2015.

FROTA, Anésia B., SHIFFER, Sueli R. **Manual de conforto térmico**. 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003, 8.ed. 243p.

GARCÍA, Adriana B.; MAZZEO, Juan P.; GRAZZI, Pablo. Calidad de edificaciones en suelo estabilizado y su evaluación mediante modelos constructivos. In: **VII Seminário Ibero-americano de Construção com Terra e III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil TERRA BRASIL 2008**. Anais. São Luís, MA: Rede PROTERRA / UEM, 2008. CD-ROM. p. 1-9.

HANCZYC, M. M.; FUJIKAWA, S.y M.; SZOSTAK, J. W. Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth, and Division. In: **Science 302**: 618-622. 2003. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/content/302/5645/618.abstract?sid=778085b9-567d-4560-b02d-dbf8ed6d761f>. Acessado em 20/10/2013.

HESÍODO. **Os trabalhos e os dias** (Primeira Parte). Trad., int. e com. de Mary de Camargo Neves Lafer. 3. ed. São Paulo: Editora Iluminuras, 1996. 103p.

HEISE, André F.; GRANJA, Ariovaldo D.; PICCHI, Flávio A. Oportunidade de aplicação dos princípios e ferramentas da mentalidade enxuta no processo de produção do painel monolítico de taipa de pilão. In: **III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2010**. Anais. Campo Grande: Rede TerraBrasil / UFMS, 2010. CD-ROM. p. 1-11.

HEISE, André F.; MINTO, Fernando C. N.; HOFFMANN, Marcio V. Proposta de contribuição para análise do desempenho técnico-construtivo das paredes de taipa de pilão. In: **IV Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2012**. Anais. Fortaleza: Rede TerraBrasil / UFC, 2012. CD-ROM. p. 1-6.

HOFFMANN, Márcio V.; GONÇALVES, Raquel. Análise da qualidade da taipa de pilão por meio de ondas ultrasônicas. In: **III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2010**. Anais. Campo Grande: Rede TerraBrasil / UFMS, 2010. CD-ROM. p. 1-9.

HOUBEN, Hugo; GUILLAUD, Hubert (colab). **Traité de construction en terre**. 2. ed. Marseille: Parentheses, 1991. 355 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **World Energy Outlook 2009 (WEO 2009)**. Paris: OECD / IEA, 2009, 696p. Disponível em <<http://www.iea.org/weo/2009.asp>>. Acesso em 05/10/2015.

INCROPERA, Frank P.; WITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Tradução de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 6.ed. 645p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO - IPT. **Relatório Técnico nº 96 166-205**: Determinação de calor específico médio de compósito mineral. São Paulo, 2007a.

_____. **Relatório Técnico nº 96 167-205**: Determinação de Resistência Térmica de Paredes. São Paulo, 2007b.

_____. **Relatório Técnico nº 96 166-205**: Determinação de calor específico médio de compósito mineral. São Paulo, 2007a.

_____. **Relatório Técnico nº 96 167-205**: Determinação de Resistência Térmica de Paredes. São Paulo, 2007b.

JIMÉNEZ, Yolanda G. A. BTC adicionados con diferentes concentraciones de mucílago de nopal y sábila en el agua de mezclado. In: **X Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, SIACOT**. Anais. Salto, Uruguay: UDELAR, 2010. CD-ROM. p. 119-128.

JORGE, Filipe. Alentejo – terra actual. In: **III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2010**. Anais. Campo Grande: Rede TerraBrasil / UFMS, 2010. CD-ROM. p. 1-5.

KING, Bruce. **Buildings of Earth and Straw: Structural Desing for Rammed Earth and Straw-Bale Architecture**. USA: Ecological Design Press, 1996. 170p.

KUTIGURA y Aganachi. **Cerimônia de construção de uma casa na Africa**. 17'23". Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=MGCMC_om1s0. Acessado em: 26/08/2014.

LATERMAN, Fany Rosa. **Solo-cimento: uma opção para habitação popular**. São Paulo, FAU, 1975.

LIPOVETSKY, Giles. **A sociedade da decepção**. Tradução Armando Braio Ara. Barueri, SP: Manole, 2007. 84p.

MAG, A. von; RAUCH, M. Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación). In: **Informes de la Construcción**, **63(523)**, 2011. p. 35-40.

MCGREGOR, Fionn; HEATH, Andrew; FODDE, Enrico; SHEA, Andy. Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. In: **Building and Environment**: **75**, 11-18, 2014.

MARCHANTE, Patrícia; CORTÉS, Marcelo. La contemporaneidad de la arquitectura en tierra a través el desarrollo técnico-expresivo del material: reinterpretación y renovación arquitectónica. In: **X Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, SIACOT**. Anais. Salto, Uruguay: UDELAR, 2010. CD-ROM. p. 77-82.

MARQUES, Milton César Silva; HADDAD, Jamil; GUARDIA, Eduardo Crestana [coordenação]. **Eficiência energética: teoria & prática**. Itajubá, MG: FUPAI, 2007. 244p.

MASCARÓ, Juan Luis. **O custo das decisões arquitetônicas**. 4ª edição. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2006. 191p.

MELLACE, Rafael F.; ALDERETE, Carlos F.; ARIAS, Lucía E. Centro regional de investigaciones de tierra cruda - Sistema Constructivo "LAMARS". In: **I Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, I SIACOT**. Anais. Edição: C. Neves; C. Santiago. Salvador: Projeto PROTERRA, 2002. p. 57-69.

MENDES, Nathan. **Modelos para previsão da transferência de calor e de umidade em elementos porosos de edificações**. Tese para obtenção de título de doutor, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. 225p.

MERLEAU-PONTY, M. **Fenomenologia da Percepção**. São Paulo: Martins Fontes, 2006. 662p.

MILANI, Ana Paula S.; BERTOCINI, Sandra R.; CASTRO, Heleodoro M. Uso de resíduo da britagem de rochas basálticas na fabricação de blocos de terra comprimida. In: **IV Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2012**. Anais. Fortaleza: Rede TerraBrasil / UFC, 2012. CD-ROM. p. 1-11.

MILANI, Ana Paula S.; SILVA, Tiago S. Uso do resíduo de minério de ferro como estabilizante de solo da região do pantanal sul mato-grossense. In: **IV Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2012**. Anais. Fortaleza: Rede TerraBrasil / UFC, 2012. CD-ROM. p. 1-8.

MINKE, Gernot. **Manual de construccion en tierra: la tierra como material de construcción y sus aplicaciones em la architecture actual**. Kassel: Nordan- Comunidad, 2001.

MINTO, Fernando C. N. Escritório em fazenda com painéis autoportantes em taipa de pilão. In: **V Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2014**. Anais. Viçosa: Rede TerraBrasil / UFV, 2014. CD-ROM. p. 1-5.

MORALES, Ramón A.; BECERRIL, Alan L. Sistemas de cubiertas y entrepisos de bajo impacto ambiental. El caso de las bóvedas mexicanas. In: **VIII Seminario Iberoamericano de Construcción com Tierra, VII SIACOT**. Anais. Tucumán, Argentina: Universidad Nacionl de Tucumán, 2009. P.163-176.

MORATA, T. V., POL, E. La apropiación del espacio: una propuesta teórica para comprender la vinculación entre las personas y los lugares. In: **Anuario de Psicología**, vol. 36, nº 3, p. 281-297. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2005.

MORIN, E. **El paradigma perdido: ensayo de bioantropologia**. Barcelona: Editorial Kairós, 1974. 263p.

NEVES, Célia Maria Martins. Inovações tecnológicas em construção com terra na Íbero-América. In: **Workshop Arquitetura de Terra**, Ornstein, Sheila Walbe (coord). São Paulo, FAUUSP, 1995. p.49-60.

NEVES, Célia Maria Martins. O uso de solo-cimento em edificações. A experiência do CEPED. In: **V Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra**. Mendoza: INCHIUSA CONICET CRICYT, 2006.

NEVES, Célia Maria Martins; FARIA, Obede Borges (Org.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. 79p. Disponível em <<http://www.redproterra.org>>. Acesso em 14/08/2013.

NEVES, Célia Maria Martins; FARIA, Obede Borges; ROTONDARO, Rodolfo; CEVALLOS, Patricio S.; HOFFMANN, Márcio Vieira. **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra – práticas de campo**. Rede Ibero-americana PROTERRA, 2009. Disponível em <http://www.redproterra.org>. Acesso em 14/08/2012.

Nicol, J.F.; Humphreys, M.A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. In: **Energy and Buildings, Volume 34, Number 6**. 2002. p. 563-572.

NORBERG-SCHULZ, Christian. O fenômeno do lugar. In: **Uma nova agenda para a arquitetura: antologia teórica (1965-1995)**. Organização: Kate Nesbitt. São Paulo: Cosac Naify, 2008.

OKAMOTO, Jun. **Percepção ambiental e comportamento: visão holística na arquitetura e na comunicação**. 2ªed. São Paulo: Editora Mackenzie, 2014. 183p.

ORUI, Samantha. Adequação das vedações em terra à norma brasileira de desempenho térmico. In: **V Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2014**. Anais. Viçosa: Rede TerraBrasil / UFV, 2014. CD-ROM. p. 1-9.

_____. **Desempenho térmico de habitações construídas com terra**. Dissertação (Mestrado Profissional) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2015. 147p.

PADFIELD, T. **The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity**. Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, Lyngby, 1998. 150P.

PALLASMAA, J. **Os olhos da pele a arquitetura e os sentidos**. Porto Alegre: Bookman, 2011. 76 p.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Basico de Mecanica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.

PIRES, Ana Luísa G. **Avaliação do comportamento higroscópico de argamassas de reboco**. Tese para obtenção de grau de mestre, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013. 99p.

PISANI, Maria Augusta Justi. Taipas: A Arquitetura de Terra. In: **Sinergia – Revista do Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo**, São Paulo, v.5, n.1, 2004. 80p.

PIVA, Ricardo J. Arquitetura contemporânea em terra crua. In: **III Seminário de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil e IV Seminário Arquitectura de Terra em Portugal**. Anais. Ouro Preto, MG: Rede PROTERRA / UFMG, 2006. CD-ROM. p. 1-6.

PONTE, Maria Manuel C. C. **Arquitetura de terra: desenho para a durabilidade das construções**. Tese para obtenção de grau de mestre, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012. 298p.

RAMOS, Luis M. El papel liberador de la nueva construcción con tierra en la evolución de la arquitectura actual. In: **II Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra, SIACOT**. Anais. Madrid, España: PROTERRA / Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2003. p.251-256.

RAPISARDA, Maximiliano A. Sistema constructivo LAMARS. In: **2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales**. Posadas, Argentina: Centro Regional de Investigación de Arquitectura de Tierra Cruda (CRIATiC) / Universidad Nacional de Tucumán. 2008. 6p.

RECRIAR COM VOCÊ. **BrickerAdobe**. Disponível em: <http://www.recriarcomvoce.com.br/blog_recriar/brickeradobe> Acessado em 23/10/2014.

REICHERT, João Miguel (editor). **Fundamentos da Ciência do Solo**. Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

RIGASSI, Vincent; CRATerre-EAG. **Compressed Earth Blocks: Manual of Production**, Volume 1. Braunschweig: Vieweg, 1985. 143p.

RODE, Carsten; PEUHKURI, Ruut; LONE, H. Mortensen; TIME, Berit; GUSTAVSEN, Arild; OJANEN, Tuomo; AHONEN, Jarkko; SVENNBERG, Kaisa; HARDERUP, Lars-Erik; ARFVIDSSON, Jasper. **Moisture buffering of building materials**. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2005. 78p.

SALMAR, Eduardo; NEGREIROS, Ana; TOGNON, Marcos. Patologias da arquitetura de terra: avaliação pós 10 anos de uso de uma residência construída em solo-cimento monolítico. In: **IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra, SIACOT e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal**. Anais. Monsaraz, Portugal: PROTERRA / Escola Superior Gallaecia, 2005. CD-ROM. p.1-11.

SCHMID, A. L. **A idéia de conforto - Reflexões sobre o ambiente construído**. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005. 339p.

SCHMIDBERGER, E. Vera. A Responsabilidade do Sector da Construção Perante o Aquecimento Global. In: **Terra em Seminário 2007, V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal**. Lisboa: Argumentum, 2007. p 1-7.

SILVA, Hélio Dias da. Construção com terra crua: as técnicas construtivas, os modos de produção e a tipologia arquitetural decorrente. In: **Workshop Arquitectura de Terra**. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 1995. 219p.

SILVA, Arthur S.; MILANI, Ana Paula S.; BERTOCINI, Sandra R. Avaliação preliminar de métodos de ensaio para caracterização mecânica de blocos de terra comprimida. In: **III Congresso de Arquitectura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2010**. Anais. Campo Grande: Rede TerraBrasil / UFMS, 2010. CD-ROM. p. 1-10.

SIMONSON, C. J.; SALONVAARA, M.; OJANEN, T. The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality. In: **Indoor Air 12:243-51**, 2002.

SOARES, José W.; BERTINI, Alexandre A.; TAVARES JR, Edmas de S. Bloco de terra compactada com adição de cinza de carvão mineral. In: **IV Congresso de Arquitectura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2012**. Anais. Fortaleza: Rede TerraBrasil / UFC, 2012. CD-ROM. p. 1-8.

SPIRN, A. W. **O jardim de granito: a natureza no desenho da cidade**. Tradução de Paulo Renato Mesquita Pellegrino. São Paulo: Edusp, 1995. 360p.

SUASSUNA, Eduardo. **Fundamentos de Geologia - Roteiro de Aula**. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/42999577/Fundamentos-de-Geologia>>. Acessado em 20/08/2013.

TAVEIRA, Eduardo Salmar Nogueira e. **O solo-cimento no campo e na cidade. Construir, Morar, Habitar**. São Paulo: Editora Icone, 1987. 120p

TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. In: **Construction and Building Materials** **29**, 2012. p. 512–519.

TORGAL, F. Pacheco; EIRES, Rute M.G.; JALALI, Said. **Construção em terra**. Guimarães, Universidade do Minho, 2009. 187p.

UNHABITAT - United Nations Centre for Human Settlements. **Earth construction technology**. Nairobi, United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), 1992. 200 p.

VARGAS, Milton. Técnica, Tecnologia e Ciência. In: **Revista Educação & Tecnologia**, Curitiba, n.6, 2003. p. 178-183.

VERALDO, Ana C.; PAZ, João G. S.; YUBA, Andrea N.; MILANI, Ana P. S. Análise do processo de produção de paredes maciças de solo estabilizado a partir do uso de mecanização. In: **V Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, TERRA BRASIL 2014**. Anais. Viçosa: Rede TerraBrasil / UFV, 2014. CD-ROM. p. 1-9.

VIRILIO, Paul. **O espaço crítico**. Tradução de Paulo Roberto Pires. Rio de Janeiro: Editora 34, 1993. 160p.

YANG, D., PENG, S., HARTMAN, M. R., GUPTON-CAMPOLONGO, T., RICE, E. J., CHANG, A. K., GU, Z., LU, G. Q. (Max), LUO, D. Enhanced transcription and translation in clay hydrogel and implications for early life evolution. In: **Scientific Reports** **3**: 3165, 2013. Disponível em: <<http://www.nature.com/srep/2013/131107/srep03165/pdf/srep03165.pdf>>. Acessado em 17/11/2013.

A. APÊNDICE A: TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO COM TERRA

O Apêndice A apresenta resumidamente as técnicas e métodos construtivos do diagrama das técnicas apresentadas por Houben e Guillard (1991). As técnicas de Taipa de Pilão e Blocos de Terra Comprimida já foram apresentadas. Algumas técnicas foram agrupadas por serem bastante semelhantes.

A.1 TERRA ESCAVADA

Essa técnica é realizada, como o próprio nome diz, escavando o terreno para criar os espaços interiores das construções. É um tipo de arquitetura muito dependente das condições climáticas e do tipo de solo, encontrada principalmente em clima quente e seco. A técnica é executada de duas formas: escavações horizontais (em planaltos) ou verticais (em morros e montanhas), numa forma de construção em negativo, removendo o material e moldando os espaços. São encontrados exemplares na China, norte da África e por todo o Mediterrâneo (Fernandes, 2006; Houben e Guillaud, 1989).

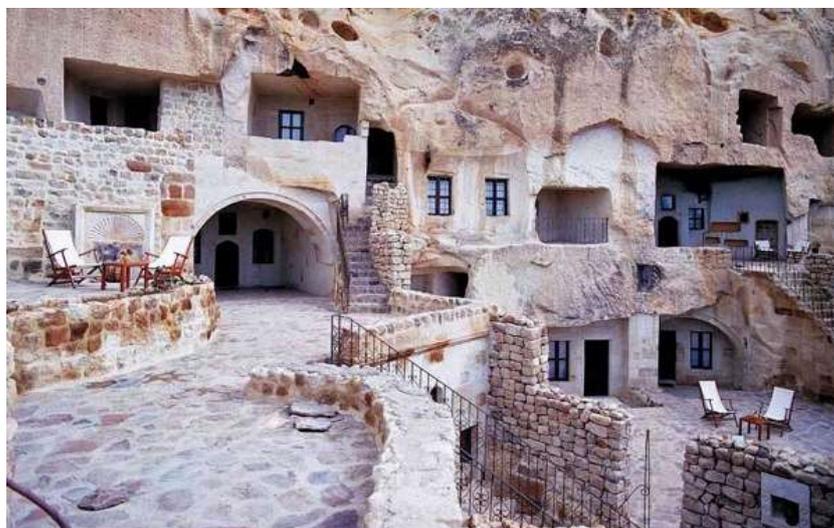


Figura A.1– Construção em Terra Escavada, tipo vertical, na Capadócia, Turquia, do século V ou IV, transformado em hotel. Fonte: site yunak

A.2 TERRA PLÁSTICA

A técnica de Terra Plástica é relativamente moderna, utilizada durante o período pós-segunda guerra, no Brasil e Estados Unidos. Utiliza a terra em estado quase líquido, e por isso,

apresenta vantagens como o uso de pouca energia na preparação, facilidade na aplicação e diversas formas de utilização, desde paredes monolíticas a pisos, moldados *in situ* ou pré-moldados. Por apresentar a mesma consistência do concreto, é possível utilizar as mesmas ferramentas e máquinas, como betoneiras e bombas. No entanto, é pouco utilizada por apresentar problemas de retração quando seca, provocando fissuras e rachaduras. Essa técnica está em desenvolvimento, sendo testados estabilizantes e menor quantidade de água para minimizar os problemas de retração (Fernandes, 2006; Houben e Guillaud, 1989).



Figura A.2– Execução de piso em Terra Plástica. Fonte: site Margotclerc



Figura A.3– Construção em Terra Plástica moldada com bambu. Fonte: site Craterre

A.3 TERRA EMPILHADA OU COB

Terra empilhada ou Cob é uma das técnicas mais antigas de construção com terra. Também chamada de *bauge* na França, consiste em empilhar bolas de terra plástica misturada com fibras vegetais até formar as paredes, fiada por fiada. Com a parede levantada, faz-se a regularização da superfície e seu revestimento, oferecendo uma aparência suave e artesanal às paredes. Normalmente são construídas com grande espessura (40-50cm), podendo receber cargas. Essa técnica permite a construção de formas arredondadas com mais facilidade do que as técnicas que pré-fabricam unidades, como blocos e tijolos e as monolíticas

Segundo Houben e Guillaud (1991), essa técnica, abandonada na Europa, possui edificações na Alemanha (além de França e Reino Unido), África, Austrália, Iémen e Afeganistão, desde pequenas casas a templos religiosos. No Brasil, é pouco utilizada e estudada, mas, segundo Silva (1995), "as qualidades dessa técnica justificam certamente estudos para sua difusão, pesquisa e desenvolvimento" (p. 35).



Figura A.4 – Execução de parede em Cob em construção na França: bola de terra sendo lançada e moldada na forma da parede. Fonte: site Roule maplume

A.4 TERRA MODELADA

A técnica de terra esculpida ou modelada é realizada através da manipulação direta da matéria-prima em estado plástico, sem a utilização de formas ou equipamentos. As edificações são construídas com reduzida e pouco qualificada mão-de-obra e instrumentos ou ferramentas rudimentares. Por outro lado, revelam a beleza das ilimitadas formas arquitetônicas e acabamentos, bastante caracterizada pelas formas circulares (mas não exclusivamente).

Essa técnica exige terras com alto índice de argila para sua modelagem. Como é utilizada em estado plástico, a retração é alta e a resistência mecânica é baixa, provocando fissuração. Exemplares são comuns em diversos países da África e nas regiões do Equador.

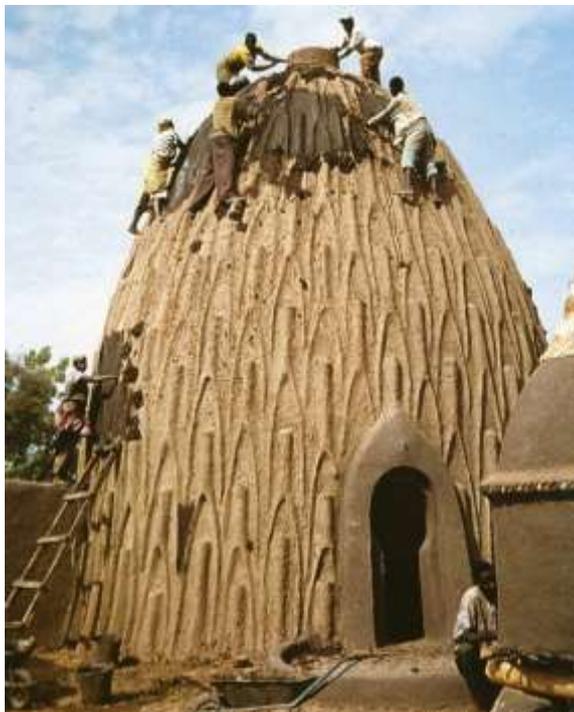


Figura A.5 - Casa "obos" da tribo Musgum, principal etnia do norte de Camarões. Além das ranhuras, sua forma em arco de catenária permite suportar grande peso com mínimo material, chegando à altura de 9 metros. Fonte: site Arquitecturas da terra

A.5 BLOCOS APILOADOS

Segundo Fernandes (2006), essa técnica é ainda encontrada na Europa mediterrânea e germânica, além da China, Austrália, em alguns países africanos e americanos e no Oriente Médio, em climas secos e quentes. Em Portugal, a técnica tradicional de blocos apilados foi recuperada nos anos 90 do século passado e é chamada de adobe, embora seja uma técnica diferente.

Basicamente, a técnica de blocos apilados é a junção das técnicas de adobe e taipa de pilão. Trata-se da execução de blocos, em que a terra quase seca é comprimida ou apilada (como na taipa de pilão) em moldes de formas de madeira quadrada ou paralelepípedica (como na fabricação de adobes) e posteriormente secas ao sol.

No Brasil, o engenheiro Fernando Pacheco desenvolveu um sistema que utiliza sacos de raschel, forma e compactador para criar um bloco de terra ensacado e apilado de dimensões aproximadas de 40x20x9cm (Recriar com você, 2014).



Figura A.6- Atividades de compactação do bloco e assentamento com a técnica desenvolvida pelo engenheiro Fernando Pacheco, que a denominou "brickeradobe". Fonte: Recriar com você, 2014.

A.6 BLOCOS CORTADOS E TORRÕES DE TERRA

Essas duas técnicas bastante similares podem ser classificadas como Terra Recortada. Edificações construídas com essas técnicas seguem os seguintes procedimentos: após recortados blocos de terra da superfície e aguardado o tempo de seca das unidades, são erigidas as paredes ou muros de alvenaria. Enquanto os Blocos Cortados tem como origem superfícies de características minerais (em especial os solos com grande concentração de hidróxidos metálicos), os Torrões de Terra são recortados de superfícies de terra vegetal. Possui diversas denominações pelo mundo, sendo chamada de *sod* na Inglaterra e EUA, *turf* na Irlanda e *torrones* e *tepetate* na América Latina.

Os Blocos Cortados são muitas vezes caracterizados como arquitetura de pedra, incorretamente, devido à rigidez originada pela oxidação dos blocos com o passar do tempo, chegando próximo à dureza de pedras. Arquitetura construída com essa técnica pode ser encontrada em regiões tropicais e subtropicais úmidas, na Índia e na África. Já os Torrões de Terra são conhecidos em toda a América, em especial nos EUA (estado de Novo México) e México, onde atualmente foram homologadas normas locais sobre a técnica (Silva, 1995 e Fernandes, 2006).



Figura A.7 - Casa construída em torrões de terra na Islândia. Fonte: site Inhabitat



Figura A.8 – Construção de pequena edificação do projeto em Terrón, da Faculdade de Arquitetura da Universidad de la República, Uruguai. O objetivo do projeto é executar a obra ensinando aos alunos essa técnica tradicional. Fonte: arquivo Alejandro Ferreiro

A.7 TERRA EXTRUDADA E ADOBE MECÂNICO

Técnicas mais recentes, a Terra Extrudada e o Adobe Mecânico são muito semelhantes. O sistema mecanizado, derivado da adaptação da indústria de cerâmica de tijolos e de máquinas agrícolas, permite a produção de grande quantidade de unidades homogêneas e qualidade controlável. A terra utilizada deve conter alto teor de argila e ser utilizada em estado plástico; essa mistura passa por um sistema mecânico de extrusão, formando longas tiras que são em seguida cortadas nas dimensões e formatos desejados. Os blocos são secos ao ar, ou seja, sem sua queima em fornos, o que proporciona economia de "50% de energia e requer 30% a menos de capital para sua instalação" (Silva, 1995, p.36).

Nos EUA, nos estados do Texas, Novo México e Califórnia, entre as décadas de 40 e 50 do século passado, essa técnica de produção de adobes foi muito utilizada. Na Alemanha e França, os adobes extrudados são utilizados nos programas de construção habitacional em larga escala. O Instituto Nacional de Pesquisas de Rennes desenvolveu um sistema industrial de produção de elementos extrudados não queimados que funciona até hoje (Silva, 1995 e Fernandes, 2006).

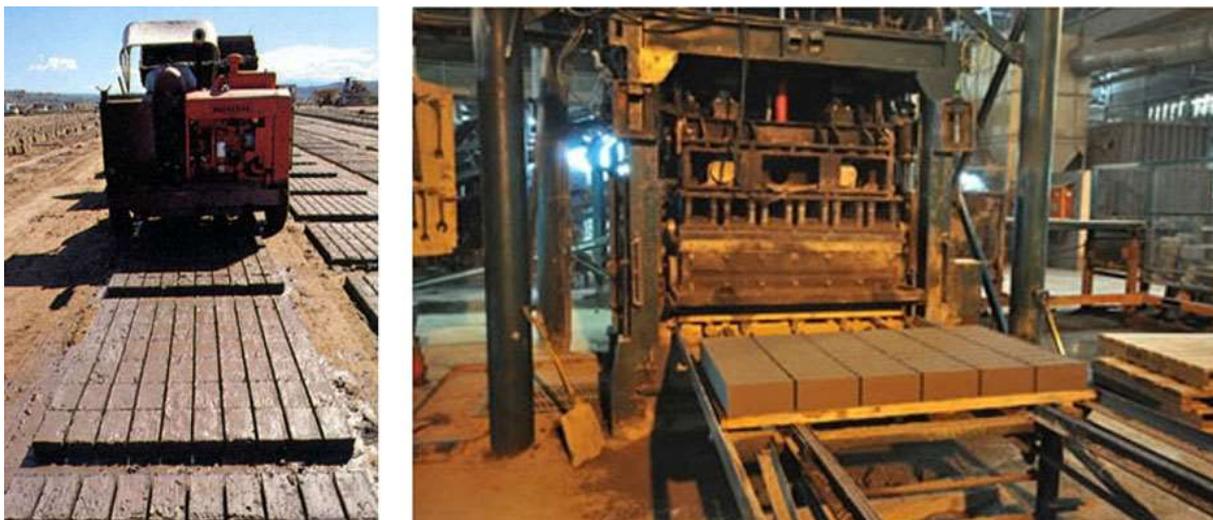


Figura A.9 – Equipamentos que misturam e extrudam a terra plástica e formam o adobe. Fontes: site Earth-auroville

A.8 ADOBE MANUAL E MOLDADO

O adobe é a técnica de construção com terra mais conhecida, utilizada e difundida por todo o planeta. Segundo Neves e Farias (2011), podem ser encontradas construções em adobe em todas as partes do mundo, antigas e modernas, urbanas e rurais, em climas quentes e frios, secos e úmidos. Existem vestígios de construções em adobe moldado na Turquia de oito mil anos de idade.

Segundo Silva (1995), o termo espanhol "adobe" é derivado de dois termos, um árabe *ottob* e outro egípcio *thobe*, que significam tijolo de barro seco ao sol. A técnica consiste, como explicitada pelo significado, na moldagem de uma porção de terra plástica ou líquida em formato de tijolo (existem diversos tipos, desde os paralelepípedicos e quadrados, até os de forma irregular) e que são empilhados e secos ao tempo, e depois, utilizados na construção de paredes. A diferença entre as técnicas está na forma de moldagem: enquanto o Adobe Moldado utiliza formas ou moldes de madeira, o Adobe Manual é moldado apenas com as mãos. Fernandes (2006) alerta que não se pode afirmar que o adobe teria evoluído do Manual para o Moldado; "ambas as técnicas persistiram ao longo da história ao mesmo tempo em regiões diferentes do globo" (p. 22).



Figura A.10 – Fábrica de adobes em Sheikh Zayed, Palestina. Fonte: site Aventar

A.9 TERRA DE RECOBRIMENTO, TERRA SOBRE ENGRADADO

A terceira família classificada por Houben e Guillaud (1991) é a que utiliza a terra como enchimento de uma estrutura de suporte, e as técnicas de Terra de Recobrimento e Terra sobre Engradado são, em princípio, muito parecidas. São encontradas por quase todo o globo e, por isso, possuem diversas nomenclaturas: conhecida internacionalmente como *torchis* (francês), em Portugal é chamada de *taipa fasquio*, nos países andinos de *baharenque* ou *quincha*, no Brasil é chamada de taipa de sopapo, pau-a-pique, taipa de mão ou simplesmente taipa (norte e nordeste do país). Também é chamada de Técnicas Mistas, uma vez que incluem vários materiais e envolvem um sistema estrutural (estrutura mestra portante e auxiliar) e o fechamento e revestimento com terra, que funciona como uma pele, regulando a temperatura, a umidade e o som da edificação (Neves e Faria, 2011).

A execução das alvenarias com essa técnica consiste em preencher uma estrutura portante, normalmente feita de madeiras, bambus ou cipós, com uma mistura de terra argilosa e fibras vegetais (palha, capim, feno) em estado plástico. Segundo Neves e Faria (2011), a utilização das fibras visa melhorar a aderência do barro à estrutura e diminuir a fissuração de terra argilosa ao secar.

Essa técnica é, atualmente, objeto de diversas pesquisas que visam seu aprimoramento, racionalização e normatização. Diversos centros de pesquisa pelo mundo estudam adições de componentes para a estabilização, processos pré-fabricados de baixo custo e acessível à mão de obra não qualificada (Silva, 1995; Neves e Faria, 2011).



Figura A.11 – Parede executada em pau-a-pique mostrando suas três fases: entramados de bambu (a), preenchimento com terra e palha (b) e revestimento (c). Fonte: arquivo do autor.

A.10 TERRA-PALHA OU *STRAW CLAY*

O *Straw Clay* é uma técnica contemporânea que utiliza a terra argilosa em estado líquido (barbotina) para solidificar e dar acabamento às fibras vegetais, normalmente na forma de blocos prensados. Os blocos de palha devem estar bem secos e com comprimento que variam de 15 a 40 cm. Segundo Silva (1995, p.37), essa técnica, muito difundida na Alemanha, "combina isolamento térmico e acústico, baixa densidade e flexibilidade na sua aplicação, permitindo a pré-fabricação de elementos da casa toda".



Figura A.12 - Construção de casa em Ille-et-Vilaine, França. Fonte: site Maison-cob-paille-bazouges

A.11 TERRA DE ENCHIMENTO

A terra é utilizada em estado seco para enchimento dos vãos de qualquer material oco, como estruturas ocas, vazios de blocos, pneus ou entre dois planos construídos em alvenaria de pedra ou tijolo (tradicionalmente utilizado em fortificações). Essa técnica é normalmente associada às construções de habitações de emergência, em condições temporárias, mas se bem empregada pode obter resultados muito bons e satisfatórios.

Essa técnica foi utilizada em diversas construções antigas, como grandes catedrais e construções romanas, além da Muralha da China, atestando sua durabilidade e eficiência. Na década de 1980, o arquiteto iraniano Nader Khalili desenvolveu um processo construtivo chamado terra ensacada ou "superadobe", que consiste no enchimento com terra de sacos de polipropileno e moldados e apilados conforme o projeto na própria obra.



Figura A.13 - Construção de paredes com a técnica de terra ensacada, desenvolvida por Nader Khalili. Fonte: site Anaveraldo

A.12 TERRA DE COBERTURA

Essa técnica consiste no emprego da terra como revestimento ou cobertura de uma estrutura independente, garantindo isolamento térmico e acústico. Uma vez que fica exposta e não faz parte da estrutura, a terra normalmente é orgânica, permitindo assim o crescimento de vegetação.

A técnica é antiga, remonta há 4000 anos nas habitações circulares enterradas em Banpoo na China. Além do instinto de defesa, seu desenvolvimento se deu também pelas necessidades de conforto ambiental. A arquitetura bioclimática tem retomado essa técnica, modernizando e desenvolvendo outros sistemas, como os tetos verdes.



Figura A.14 - Escritório central da UNESCO em Paris, França. Fonte: site Conexão Paris

APÊNDICE B: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DOS COMPONENTES

Como visto nos capítulos anteriores, a variação de técnicas de construção com terra, as diferentes composições granulométricas e químicas do material e as diversas formas de estabilização do solo podem alterar consideravelmente o arranjo entre as partículas do material nas paredes. Diversas pesquisas ensaiaram amostras de elementos construídos em terra e os valores das propriedades térmicas encontradas indicam essa interferência.

Fica claro que a estabilização com cimento diminui significativamente a condutibilidade térmica – λ – e que a compactação, através de um arranjo com menos poros entre as partículas, aumenta a densidade - ρ (Tabela 0.1).

Tabela 0.1- Propriedades térmicas

Material / Técnica	Fonte	Densidade (ρ) [kg/m ³]	Condut. térmica (λ) [W/m K]	Calor específico (c) [J/kg K]
Solo compactado	Moita, 2010	1800	1,40	792
Terra comprimida (bloco)	Frota e Shiffer, 2003	1800	1,15	837
Terra maciça	Minke, 2001	1800	0,95	-
Solo cimento furado	IPT, 2007a / b	1713	0,63	800
Solo cimento maciço	Ferreira, 2003	1868	0,49	750
Taipa de pilão – 70%areia + 30%silte e argila)	Allinson e Hall, 2012	1980	0,87	868

Para os cálculos relacionados ao BTC estabilizado com cimento, serão consideradas as propriedades térmicas do solo cimento maciço segundo Ferreira (2003). Para a taipa de pilão, serão utilizadas as fornecidas por Allinson e Hall (2012).

Para a comparação direta entre os resultados dos cálculos, serão consideradas paredes com espessura de 15cm. Assim, a parede de taipa de pilão estabilizada (parede monolítica em solo-cimento) terá 15cm de espessura total, não sendo revestida com reboco. A parede de BTC será calculada com tijolos de dimensões 30x15x7,5cm e furos de diâmetro de 7cm, assentados com argamassa de 0,5cm, também sem revestimento de reboco. Para os cálculos do BTC será considerada uma câmara de ar não ventilada com área proporcional aos furos do bloco (Figura 0.1).

Além dessas duas paredes, será apresentada para comparação uma de tipologia convencional, com os parâmetros descritos na NBR 15220-3 (ABNT, 2005), sendo: parede de tijolos de oito furos circulares, assentados na menor dimensão com dimensões 10x20x20cm, espessura da argamassa de assentamento e 1cm e espessura da argamassa de emboço de 2,5cm, totalizando 15cm de espessura (Figura 0.2). As propriedades térmicas da parede convencional são apresentadas pela NBR 15220-3:2005.

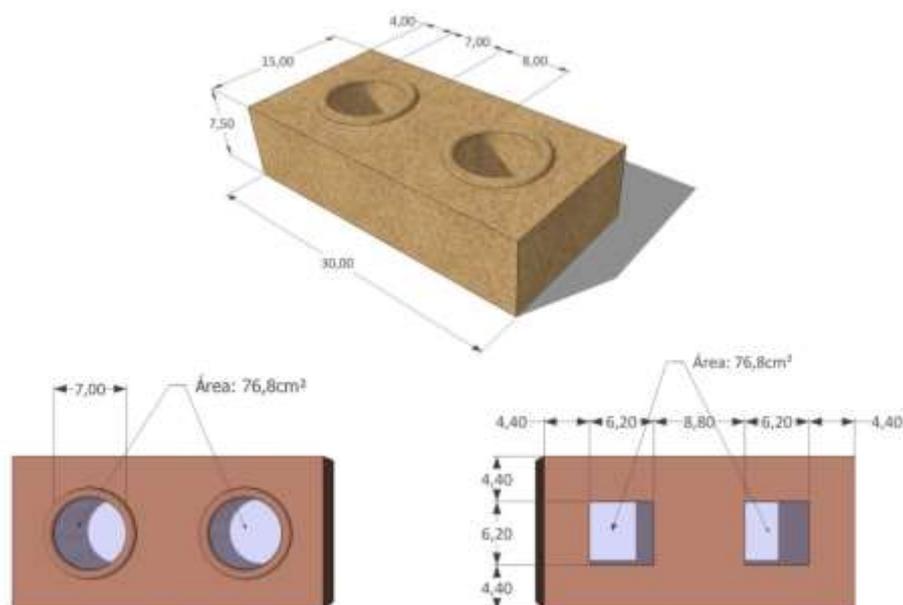


Figura 0.1: Dimensões do BTC e área equivalente da câmara de ar não ventilada.

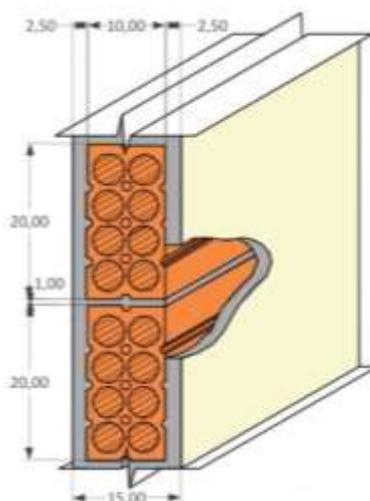


Figura 0.2: Dimensões de uma parede convencional, segundo NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

A seguir serão apresentados os cálculos das paredes em painel monolítico de solo cimento e de BTC segundo a metodologia descrita na NBR 15220-2: Métodos de cálculo da

transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos componentes de edificações (ABNT, 2005).

B.1 PAINEL MONOLÍTICO DE SOLO-CIMENTO

Dados do solo cimento:

$$\rho_{\text{taipa 703}} = 1980 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{taipa 703}} = 0,87 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{taipa 703}} = 0,868 \text{ kJ/(kg.K)}$$

a) Resistência térmica da parede (superfície à superfície) (R_t)

Uma vez que a painel monolítico é formado por camada homogênea, temos:

$$R_t = \frac{e_{\text{taipa 703}}}{\lambda_{\text{taipa 703}}} = \frac{0,15}{0,87} = \mathbf{0,172 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}}$$

b) Resistência térmica total (ambiente a ambiente) (R_T)

Considerando-se, da tabela A.1 da NBR 15220 (ABNT, 2005, p.07), para fluxo horizontal, tem-se $R_{se}=0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ e $R_{si}=0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, portanto:

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} = 0,04 + 0,172 + 0,13 = \mathbf{0,342 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}}$$

c) Transmitância térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,342} = \mathbf{2,92 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}}$$

d) Capacidade térmica da parede (C_T):

$$C_T = e_{\text{taipa 703}} \cdot c_{\text{taipa 703}} \cdot \rho_{\text{taipa 703}} = 0,15 \cdot 0,868 \cdot 1980 = \mathbf{257,8 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}}$$

e) Atraso térmico (ϕ):

$$\phi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot C_T} = 0,7284 \cdot \sqrt{0,172 \cdot 257,8} = \mathbf{4,85 \text{ horas}}$$

f) Fator solar (FS_o):

O Fator solar tem relação com a absorptância para radiação solar (α) e para efeito de comparação entre as paredes, será considerada pintura branca em todas. Segundo a tabela B.2 da NBR 15220 (ABNT, 2005, p.08), $\alpha = 0,30$, portanto:

$$FS_o = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} = 100 \cdot 2,92 \cdot 0,30 \cdot 0,04 = \mathbf{3,50\%}$$

B.2 BLOCO DE TERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA

Dados:

$$\rho_{\text{solo-cimento}} = 1868 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{solo-cimento}} = 0,49 \text{ W/(m.K)}$$

$$C_{\text{solo-cimento}} = 0,75 \text{ kJ/(kg.K)}$$

$$\rho_{\text{argamassa}} = 2000 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Tabela D.1, ABNT, 2005})$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = 1,15 \text{ W/(m.K)} \quad (\text{Tabela D.1, ABNT, 2005})$$

$$C_{\text{argamassa}} = 1,00 \text{ kJ/(kg.K)} \quad (\text{Tabela D.1, ABNT, 2005})$$

a) Resistência térmica da parede (superfície à superfície) (R_t)

A parede de BTC estabilizados é formada por camadas heterogêneas (Figura 0.3) e para cálculo será utilizado método adequado. As propriedades térmicas da argamassa são apresentadas na tabela D.1 e a resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas na tabela B.1, ambas da NBR 15220 (ABNT, 2005).

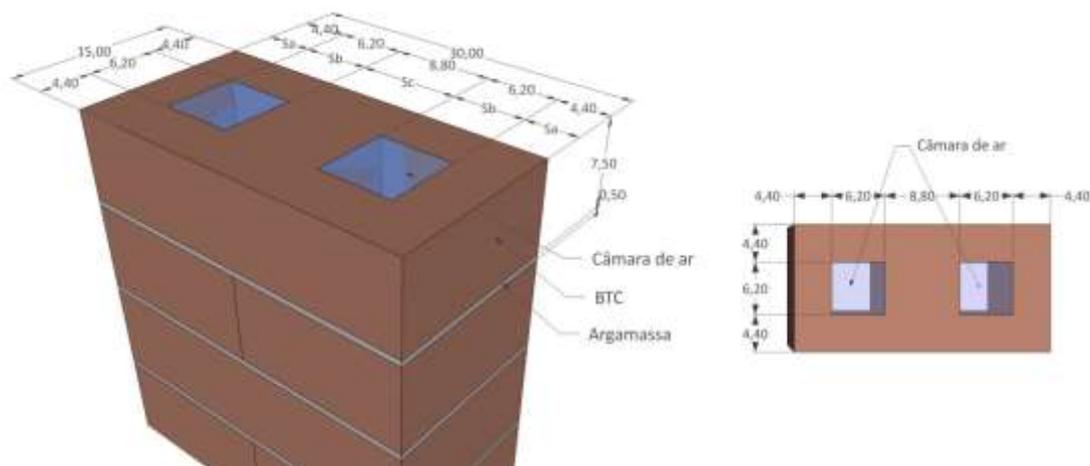


Figura 0.3: Representação esquemática da parede de BTC, com suas características geométricas e indicação das seções SA, SB e SC, tanto da argamassa quanto do BTC.

Seção A argamassa (argamassa)

$$A_{\text{argamassa}} = 0,044 \times 0,005 = 0,00022 \text{ m}^2$$

$$R_{A \text{ argamassa}} = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,15}{1,15} = \mathbf{0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}}$$

Seção B argamassa (argamassa + camada de ar + argamassa)

$$A_{B \text{ argamassa}} = 0,062 \times 0,005 = 0,00031 \text{ m}^2$$

$$R_{B \text{ argamassa}} = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,044}{1,15} + 0,17 + \frac{0,044}{1,15} = \mathbf{0,247 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}}$$

Seção C argamassa (argamassa)

$$A_{C \text{ argamassa}} = 0,088 \times 0,005 = 0,00044 \text{ m}^2$$

$$R_{C \text{ argamassa}} = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,15}{1,15} = \mathbf{0,13} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Seção A solo cimento (BTC)

$$A_{A \text{ solo cimento}} = 0,044 \times 0,075 = 0,0033 \text{ m}^2$$

$$R_{A \text{ solo cimento}} = \frac{e_{\text{solo-cimento}}}{\lambda_{\text{solo-cimento}}} = \frac{0,15}{0,49} = \mathbf{0,306} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Seção B solo cimento (BTC + camada de ar + BTC)

$$A_{B \text{ solo cimento}} = 0,062 \times 0,075 = 0,00465 \text{ m}^2$$

$$R_{B \text{ solo cimento}} = \frac{e_{\text{solo-cimento}}}{\lambda_{\text{solo-cimento}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{solo-cimento}}}{\lambda_{\text{solo-cimento}}} = \frac{0,044}{0,49} + 0,17 + \frac{0,044}{1,15} = \mathbf{0,35} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Seção C solo cimento (BTC)

$$A_{C \text{ solo cimento}} = 0,088 \times 0,075 = 0,0066 \text{ m}^2$$

$$R_{C \text{ solo cimento}} = \frac{e_{\text{solo-cimento}}}{\lambda_{\text{solo-cimento}}} = \frac{0,15}{0,49} = \mathbf{0,306} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Portanto, a resistência térmica da parede é:

$$R_t = \frac{2 \cdot A_{A \text{ arg}} + 2 \cdot A_{B \text{ arg}} + A_{C \text{ arg}} + 2 \cdot A_{A \text{ so.ci.}} + 2 \cdot A_{B \text{ so.ci.}} + A_{C \text{ so.ci.}}}{\frac{2 \cdot A_{A \text{ arg}}}{R_{A \text{ arg}}} + \frac{2 \cdot A_{B \text{ arg}}}{R_{B \text{ arg}}} + \frac{A_{C \text{ arg}}}{R_{C \text{ arg}}} + \frac{2 \cdot A_{A \text{ so.ci.}}}{R_{A \text{ so.ci.}}} + \frac{2 \cdot A_{B \text{ so.ci.}}}{R_{B \text{ so.ci.}}} + \frac{A_{C \text{ so.ci.}}}{R_{C \text{ so.ci.}}}}$$

$$R_t = \frac{2 \cdot 0,00022 + 2 \cdot 0,00031 + 0,00044 + 2 \cdot 0,0033 + 2 \cdot 0,00465 + 0,0066}{\frac{2 \cdot 0,00022}{0,13} + \frac{2 \cdot 0,00031}{0,247} + \frac{0,00044}{0,13} + \frac{2 \cdot 0,0033}{0,306} + \frac{2 \cdot 0,00465}{0,35} + \frac{0,0066}{0,306}} = \mathbf{0,304} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

b) Resistência térmica total (ambiente à ambiente) (R_T)

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} = 0,04 + 0,304 + 0,13 = \mathbf{0,474} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

c) Transmitância térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,474} = \mathbf{2,11} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

d) Capacidade térmica da parede (C_T):

Seção A argamassa (argamassa)

$$A_{A \text{ argamassa}} = 0,044 \times 0,005 = 0,00022 \text{ m}^2$$

$$C_{TA \text{ arg.}} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} = 0,15 \cdot 1,00 \cdot 2000 = \mathbf{300 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

Seção B argamassa (argamassa + camada de ar + argamassa)

$$A_{B \text{ argamassa}} = 0,062 \times 0,005 = 0,00031 \text{ m}^2$$

$$C_{TB \text{ arg.}} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{arg.}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{arg.}}$$

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar, tem-se:

$$C_{TA} = 0,044 \cdot 1,00 \cdot 2000 + 0 + 0,044 \cdot 1,00 \cdot 2000 = \mathbf{176 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

Seção C argamassa

$$A_{C \text{ argamassa}} = 2 \cdot A_{A \text{ argamassa}} = 2 \cdot 0,00022 = 0,00044 \text{ m}^2$$

$$C_{TC \text{ arg.}} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} = 0,15 \cdot 1,00 \cdot 2000 = \mathbf{300 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

Seção A solo cimento (BTC)

$$A_{A \text{ solo cimento}} = 0,044 \times 0,075 = 0,0033 \text{ m}^2$$

$$C_{TA \text{ sol.ci.}} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{solo-cimento}} = 0,15 \cdot 0,75 \cdot 1868 = \mathbf{210,15 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

Seção B solo cimento (BTC + camada de ar + BTC)

$$A_{B \text{ solo cimento}} = 0,062 \times 0,075 = 0,00465 \text{ m}^2$$

$$C_{TB \text{ sol.ci.}} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{sol.ci.}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{sol.ci.}} = 2 \cdot (0,044 \cdot 0,75 \cdot 1868) = \mathbf{123,29 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

Seção C solo cimento (BTC)

$$A_{C \text{ solo cimento}} = 2 \cdot A_{A \text{ solo cimento}} = 2 \cdot 0,0033 = 0,0066 \text{ m}^2$$

$$C_{TC \text{ sol.ci.}} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{solo-cimento}} = 0,15 \cdot 0,75 \cdot 1868 = \mathbf{210,15 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

Portanto, a capacidade térmica da parede é:

$$C_T = \frac{2 \cdot A_{A \text{ arg}} + 2 \cdot A_{B \text{ arg}} + A_{C \text{ arg}} + 2 \cdot A_{A \text{ sol.ci.}} + 2 \cdot A_{B \text{ sol.ci.}} + A_{C \text{ sol.ci.}}}{\frac{2 \cdot A_{A \text{ arg}}}{C_{TA \text{ arg}}} + \frac{2 \cdot A_{B \text{ arg}}}{C_{TB \text{ arg}}} + \frac{2 \cdot A_{C \text{ arg}}}{C_{TC \text{ arg}}} + \frac{2 \cdot A_{A \text{ sol.ci.}}}{C_{TA \text{ sol.ci.}}} + \frac{2 \cdot A_{B \text{ sol.ci.}}}{C_{TB \text{ sol.ci.}}} + \frac{A_{C \text{ sol.ci.}}}{C_{TC \text{ sol.ci.}}}} =$$

$$C_T = \frac{2 \cdot 0,00022 + 2 \cdot 0,00031 + 0,00044 + 2 \cdot 0,0033 + 2 \cdot 0,00465 + 0,0066}{\frac{2 \cdot 0,00022}{300} + \frac{2 \cdot 0,00031}{176} + \frac{0,00044}{300} + \frac{2 \cdot 0,0033}{210,15} + \frac{2 \cdot 0,00465}{123,29} + \frac{0,0066}{210,15}} = \mathbf{165,86 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

e) Atraso térmico (ϕ):

$$\phi = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot C_T} = 0,7284 \cdot \sqrt{0,304 \cdot 165,86} = \mathbf{5,17 \text{ horas}}$$

f) Fator solar (FS_o):

$$\alpha = 0,30 \quad (\text{parede branca Tabela B.2, ABNT, 2005})$$

$$FS_o = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} = 100 \cdot 2,11 \cdot 0,30 \cdot 0,04 = \mathbf{2,53\%}$$