

# Construção em Terra

F. Pacheco Torgal

Rute M. G. Eires

Said Jalali



Universidade do Minho

Guimarães 2009



# Construção em Terra

F. Pacheco Torgal

Rute M.G. Eires

Said Jalali

**Edição**  
TecMinho

**Arranjo Gráfico**  
Andrea Mota

**ISBN**  
978-972-8692-40-7

**Impressão**  
*Publidisa*

DELEGACIÓN PORTUGAL

Av. 5 de Outubro 10

Tel.: (+351) 21 350 70 00

Fax.: (+351) 21 353 41 94



Universidade do Minho

Guimarães 2009



# Prefácio

Até há bem pouco tempo, falar da construção em terra em Portugal, seria falar de uma construção utilizada num passado mais ou menos distante por franjas populacionais de fracos recursos económicos, que na impossibilidade de conseguirem adquirir materiais modernos como o aço, o cimento ou o tijolo, mais não lhes restava que utilizarem aquilo que a natureza fornecia gratuitamente. Infelizmente e embalados por essa errónea convicção, esquecemo-nos de procurar justificações racionais, para o facto de países economicamente muito mais folgados do que nós, como a França ou a Alemanha, se terem empenhado há já algum tempo em valorizar e fomentar a construção em terra. Na verdade não existem quaisquer argumentos que não sejam os de ordem estritamente cultural que possam justificar a forma como depreciativamente olhamos para a construção em terra no nosso país.

O panorama atrás descrito começou já felizmente a mudar, sendo hoje visíveis muitos exemplos no Alentejo e Algarve, que evidenciam um ressurgimento da construção em terra. Para além do caso da Câmara Municipal de Odemira que desde 2005 baixou substancialmente as taxas para a construção das habitações em taipa, ou mais recentemente o caso da Câmara Municipal de Vilamoura que este ano iniciou a construção de duas Escolas Básicas com alvenarias de adobe, juntam-se ainda vários empreendimentos turísticos junto na Costa Vicentina e também várias moradias unifamiliares um pouco por todo o Sul do país. No entanto e comparativamente às centenas de milhares de fogos que caracterizam o parque habitacional Português, a construção em terra representa ainda uma percentagem tão reduzida que praticamente não tem expressão estatística.

Tendo em conta que, para além de vantagens várias relativamente á construção tradicional como por exemplo, ser menos propensa a doenças do foro respiratório, apresentar menor poluição e menor geração de resíduos, a construção em terra apresenta ainda vantagens em termos de poupanças energéticas substanciais, sendo que este último factor se assume como crucial num país que tem no seu défice energético um dos seus mais graves problemas económicos e ambientais. Torna-se por isso não já só uma questão de bom senso, mas mesmo imperioso incentivar a construção em terra, tarefa para a qual esta obra pretende contribuir ainda que modestamente.

Said Jalali  
Universidade do Minho



# ÍNDICE

<i>Prefácio</i>	05
<b>1 A Construção em Terra</b>	09
Enquadramento Histórico	10
Panorama Actual	17
Perspectivas Futuras	27
<b>2 Técnicas Construtivas Utilizadas</b>	29
Considerações Prévias	30
Taipa	33
Adobe	42
BTC	47
<b>3 Caracterização dos Solos</b>	55
Generalidades	56
Testes de Caracterização	56
Propriedades e Classificação	63
Estabilização	70
<b>4 Propriedades</b>	81
Resistência Mecânica	82
Módulo de Elasticidade	89
Resistência aos Sismos	91
Desempenho Termo-Higrométrico	97
Isolamento Acústico	101
<b>5 Durabilidade</b>	105
Considerações Prévias	106
Ensaio de Avaliação da Durabilidade	110

<b>6</b>	<b><i>Revestimentos</i></b>	117
	Considerações Prévias	118
	Aderência ao Suporte	120
	Resistência Mecânica	121
	Porosidade, absorção e permeabilidade ao vapor	124
<b>7</b>	<b><i>Diagnóstico das Principais Patologias</i></b>	129
	Patologias Estruturais	130
	Patologias Não Estruturais	134
<b>8</b>	<b><i>Propostas de Reabilitação</i></b>	137
	Fundações	138
	Paredes	138
	Cobertura	140
	Reforço Estrutural	141
	Revestimentos	143
	Tratamento de Umidades	144
<b>9</b>	<b><i>Considerações Económicas</i></b>	147
<b>10</b>	<b><i>Análise de Sustentabilidade</i></b>	151
	Considerações Prévias	152
	Consumo de Recursos não Renováveis, Poluição e Resíduos	155
	Consumo de Energia e Emissões de Carbono	156
	Toxicidade e Qualidade do Ar Interior	164
<b>11</b>	<b><i>Referências</i></b>	169
<b>12</b>	<b><i>Outra Bibliografia</i></b>	177
<b>13</b>	<b><i>Índice de Figuras</i></b>	181
<b>14</b>	<b><i>Índice de Tabelas</i></b>	185

# 1

## A Construção em Terra

Enquadramento Histórico

Panorama Actual

Perspectivas Futuras

## Enquadramento Histórico

Não é consensual a data em que o homem começou a utilizar a terra na construção. Minke (2006) refere que deve ter sido há mais de 9.000 anos, estribando essa convicção na descoberta de habitações no actual Turquemenistão à base de blocos de terra (adobe) datadas de um período entre 8.000 a 6.000 a.C. Já Pollock (1999) afirma que a utilização da terra para construção remonta ao período de El-Obeid na Mesopotâmia (5.000 a 4.000 a.C.). Por outro lado, Berge (2009) refere que datam de 7.500 a.C os exemplares mais antigos de blocos de adobe, os quais foram descobertos na bacia do rio Tigres, pelo que na sua opinião as habitações em terra poderão ter começado a ser usadas há mais de 10.000 anos.

Não parece contudo ser muito relevante (no que ao presente livro respeita), saber se a construção em terra se iniciou há mais de 9.000 ou há mais de 10.000 anos. Porém, não se estará muito longe da verdade se se admitir que a construção em terra tenha tido o seu início juntamente com o início das primeiras sociedades agrícolas num período cujos conhecimentos actuais remontam entre 12.000 a 7.000 a.C. São inúmeros os casos de construções em terra, que executadas há alguns milhares de anos atrás conseguiram chegar ao séc.XXI. O Templo de Ramsés II em Gourna, construído em adobe há 3200 anos é um deles (Figura 1.1)



*Figura 1.1: Templo de Ramsés, Gourna, Egipto (Minke 2006)*

Também a Grande Muralha da China, cuja construção se iniciou há aproximadamente 3.000 anos apresenta troços bastante extensos construídos em taipa (Figura 1.2). Importa também ter presente que muitos troços que inicialmente foram construídos em taipa só mais tarde foram revestidos com alvenaria de pedra.



*Figura 1.2: Utilização de taipa na Grande Muralha da China (Jaquin, 2008)*

Existem indícios relativos à utilização da construção em terra, pelos fenícios pela bacia do Mediterrâneo incluindo Cartago em 814 A.C (Jaquin, 2008). Este autor refere descrições de Plínio o Velho, sobre a construção de torres de terra levadas a cabo pelos exércitos do General Cartaginês Aníbal durante a invasão da Ibéria em 218 A.C. No Japão, o Templo de Horyuji possui paredes de taipa construídas há 1300 anos atrás (Figura 1.3).



*Figura 1.3: Templo de Horyuji-  
Japão*

Jaquin (2008) refere a existência de construções em taipa na região dos Himalaias construídas no Séc. XII há aproximadamente 800 anos atrás. Foi também por essa altura que se iniciaram as invasões árabes ao Norte de África e à Península Ibérica, onde aqueles deixaram vestígios de construções de taipa. O mesmo autor reproduz um manuscrito indo-muçulmano de idade indefinida contendo pormenores da construção em taipa (Figura 1.4).

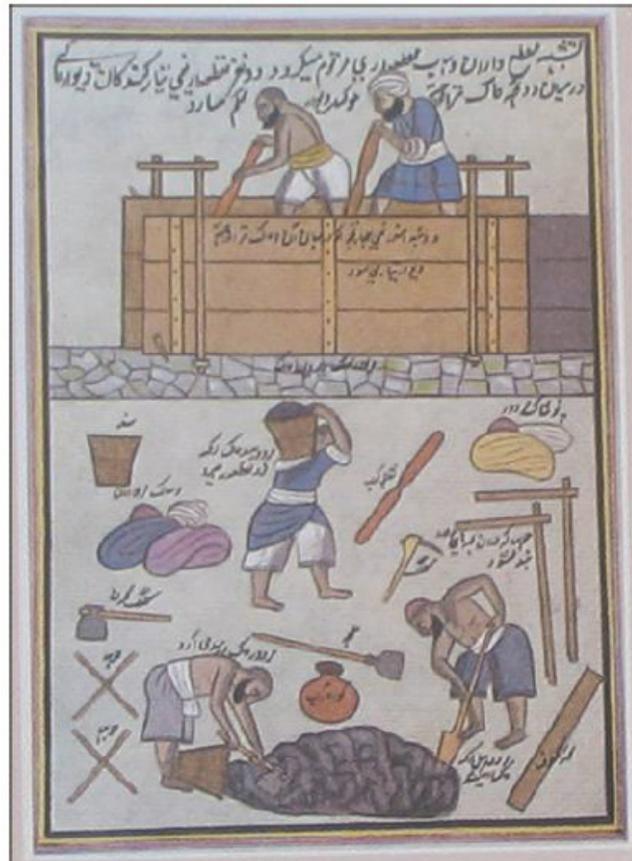


Figura 1.4: Manuscrito com pormenores da construção em taipa (Jaquin, 2008)

A pirâmide de Uxmal, no México, construída entre os séculos VI e X é um exemplo de uma mega-estrutura construída com terra. O seu centro é de terra compactada e o exterior é recoberto por pedras. A Pirâmide do Sol, também no México, em Teotihuacán, tem no seu núcleo aproximadamente dois milhões de toneladas de terra compactada (Figura 1.5)



*Figura 1.5: Pirâmide do Sol de Teotihuacan, México*

Estruturas de adobe são comuns nas construções da América Central. As ruínas da cidade de Chanchán no Peru constituem um dos mais antigos conjuntos arquitetônicos feitos com terra (Alexandra, 2006). Entre as construções mais antigas com uso de terra, está também o Povoado de Taos, no estado do Novo México, que foi erguido entre 1000 e 1500 D.C, com paredes de argila seca ao sol e reforçada com fibras vegetais (Figura 1.6).



*Figura 1.6: Edificações em terra, Taos, Novo México*

Existe uma cidade histórica hoje ainda habitada, a cidade de Shibam do Iémen, que teve origem no século III, embora os edifícios que persistiram até aos nossos dias sejam na sua maioria do século XVI. A cidade é composta por edifícios os quais possuem entre 5 a 11 andares (Helfritz, 1937), havendo inclusive um minarete que tem 38 m de altura. Estes, são construídos com paredes exteriores em adobe cuja espessura se estreita gradualmente nos andares superiores para aligeirar o seu peso e melhorar a estabilidade (Figura 1.7).



*Figura 1.7: Edifícios em adobe, Shibam, Iémen*

Na Península Ibérica, a construção em terra terá surgido por influência de diversos povos como os Fenícios, Cartagineses, Romanos ou Muçulmanos. Tendo sido maior a influência por parte dos últimos que foram os que mais divulgaram este tipo de construção (Ribeiro 1969). Existem ainda alguns exemplos de arquitectura militar islâmica em taipa no nosso país, como os Castelos de Paderne (Figura 1.8) e de Silves (taipa forrada a pedra vermelha grés).

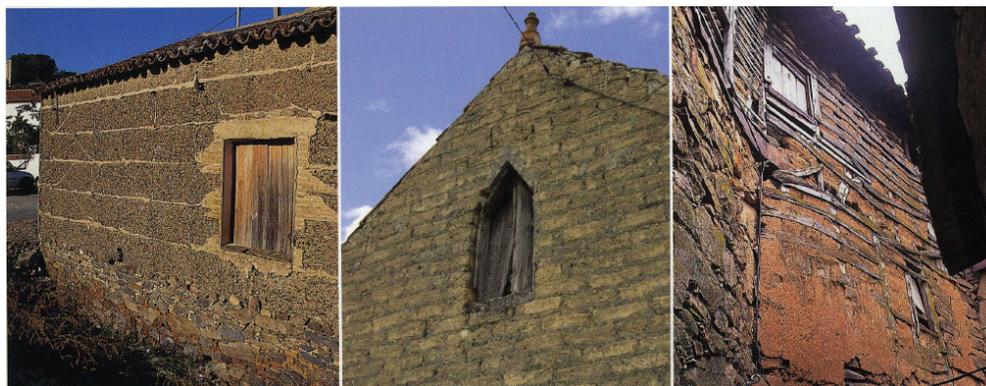


*Figura 1.8: Castelo de Paderne, Algarve*

A construção de terra em Portugal data de há várias centenas de anos. No início do séc.XX assistiu-se ao declínio deste tipo de construção para a construção em tijolo de barro cozido, contudo no fim do mesmo séc., é patente o início de um movimento edificatório no Sul de Portugal caracterizado pelo retomar de ancestrais técnicas de construção.

Actualmente podem ainda observar-se em quase todo o nosso país, vários edifícios antigos, os quais ilustram as diversas técnicas tradicionais de construção em terra. Na zona abaixo do Tejo e estendendo-se até ao Algarve,

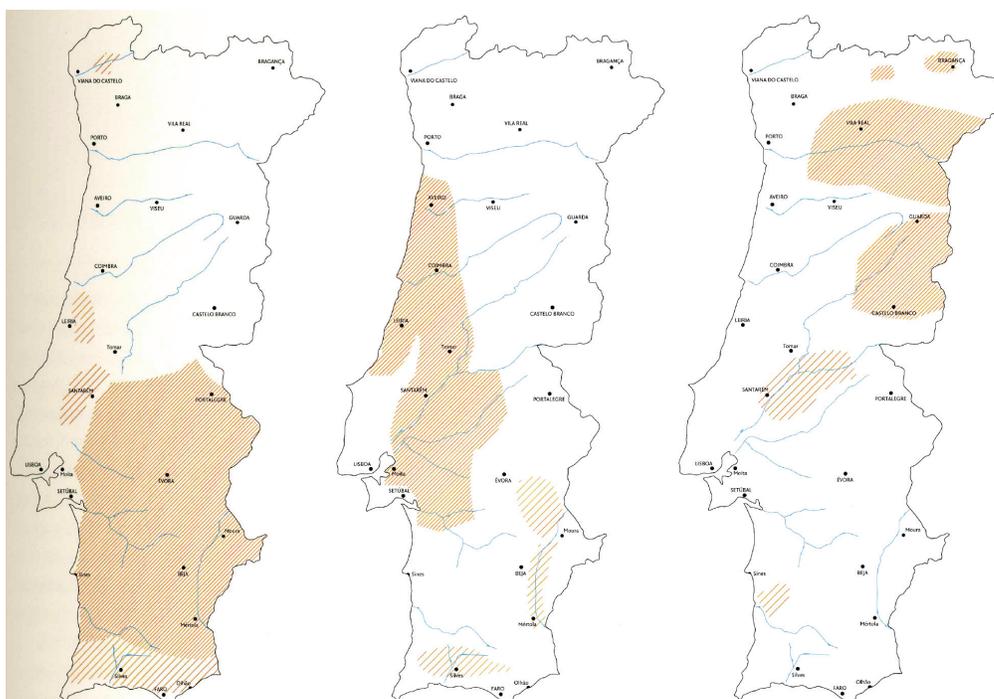
podem ainda hoje encontrar-se exemplares construídos em taipa (Figura 1.9a), técnica que consiste na execução de paredes auto-portantes *in situ*.



a)

b)

c)



**Figura 1.9:** Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique (imagem extraída de Jorge et al., 2005)

Pinho (2001) refere que acima do Tejo há registos de edifícios com paredes de taipa em bolsas localizadas no Baixo Douro, na zona de Aveiro-Mira, no Vale do Tejo e ainda na zona da raia junto a Castelo Branco. Carvalho *et al.* (2008) analisaram solo utilizado na construção de paredes de taipa na região de Trás-os-Montes e Alto Douro, concluindo pela utilização nas mesmas de

estabilizantes de cal. Já quanto aos edifícios de paredes feitas com recurso a blocos de terra (adobe), estes localizam-se numa faixa mais ou menos rectangular que se estende de Sul para Norte e abarca vários distritos a saber, Setúbal, Évora, Portalegre, Santarém, Leiria, Coimbra e Aveiro (Figura 1.9 b).

Segundo Pinho (2001) as paredes de adobe seguiam as regras para as alvenarias de tijolo de barro cozido, com a ressalva de serem utilizadas em “construções pobres”. Edifícios com paredes constituídas por um engradado de madeira e preenchidas por terra (tabique), podem ainda hoje em dia ser encontrados na zona das Beiras (Baixa e Alta), Trás-os Montes e entre Douro e Minho (Figura 1.9 c). Araújo (2005), cita Galhano & Oliveira (1992) para quem as construções em tabique em Portugal são anteriores ao séc. XVII.

## Panorama Actual

Vários autores (Rael, 1971; Dethier, 1986; Eires & Jalali, 2008) referem que quase 50% da população mundial vive em habitações feitas com terra, qualquer coisa como 3.000 milhões de indivíduos (Figura 1.10).



*Figura 1.10: Mapa-mundo - Zonas com elevada densidade de construção em terra*

Contudo, o facto dessas referências estarem cronologicamente desfasadas entre si de quase três décadas, não permite no entanto perceber de que forma é que essa percentagem se alterou nesse espaço de tempo. Sendo que no mesmo período a população mundial passou de 3,7 mil milhões para 6.500 milhões de indivíduos e as projecções existentes apontam para que nas próximas 3 décadas, esse valor possa chegar a 9.000 milhões.

Cruzando a localização das zonas com maior densidade de construção em terra, com a informação relativa aos valores da precipitação e temperatura médias anuais a nível mundial (Figura 1.11), não se pode afirmar que exista uma relação óbvia e directa entre ambas.

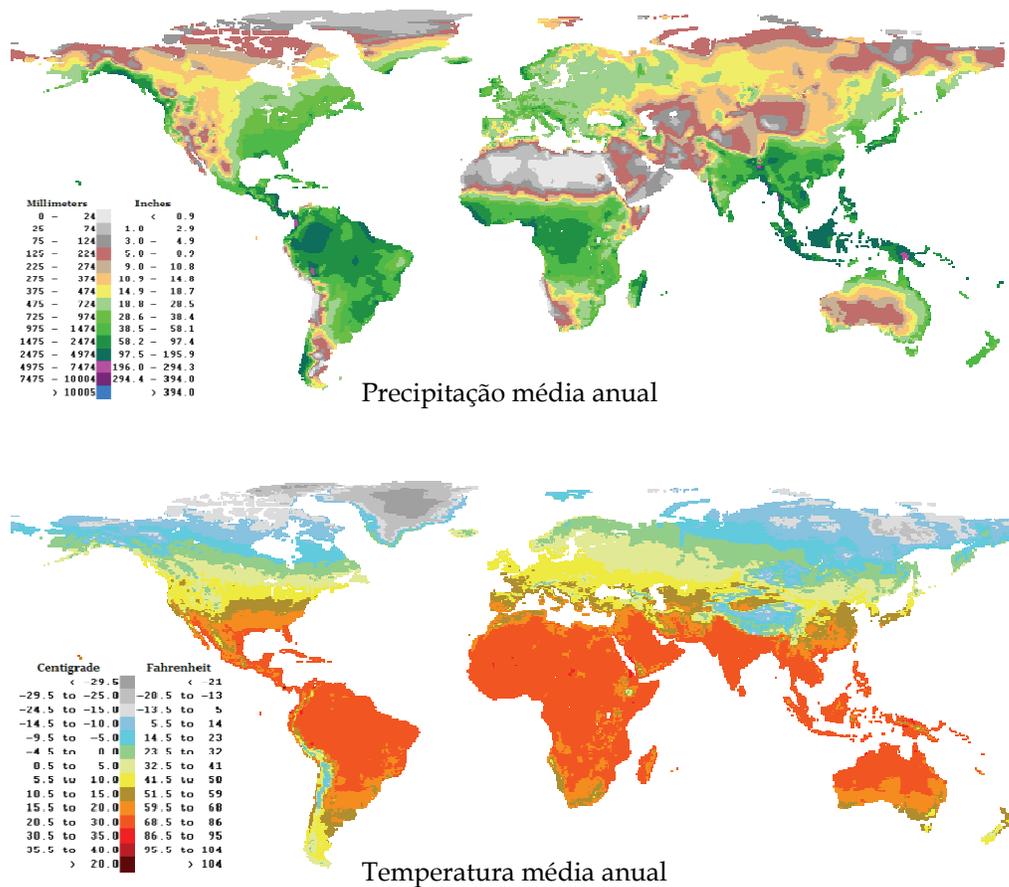


Figura 1.11: Mapa-mundo - Precipitação e temperatura médias anuais

Na verdade, é possível encontrar construção em terra onde a temperatura não é muito elevada como por exemplo na Europa ou na Ásia. O mesmo se podendo dizer relativamente à precipitação, sendo clara a existência de construções em terra em zonas de elevada pluviosidade, como é caso da América do Sul ou mesmo do Reino Unido, onde alguns autores referem que existem 500.000 fogos habitados de construção em terra (Little & Morton, 2001).

Aliás, tanto o Reino Unido como a Alemanha ou a França, são alguns exemplos a nível Europeu onde desde há já algumas décadas que a construção em terra, começou a ser encarada como uma alternativa bastante credível à construção corrente, à base de alvenaria de pedra ou de tijolo cozido.

Também nos Estados Unidos, Brasil e Austrália se tem assistido a um crescimento bastante significativo deste tipo de construção, fundamentalmente devido à actualidade da temática do desenvolvimento sustentável, do qual a mesma é parte indissociável.

Na França, o Grupo CRATerre, um Laboratório de investigação ligado à Escola de Arquitectura de Grenoble e constituído em 1979, adquiriu a partir de 1986 uma dimensão institucional com o reconhecimento do próprio Estado Francês. Tendo-se afirmado a nível internacional como uma referência incontornável em termos da construção em terra e do desenvolvimento sustentável do qual a mesma é parte indissociável.

Schroeder *et al.* (2008a) referem a existência na Alemanha de formações vocacionais acerca da construção em terra e também de cursos que conferem o título de Especialista. No entanto ao nível universitário, só três instituições oferecem cursos sobre este tema, respectivamente a Universidade de Kassel, a Universidade de Ciências Aplicadas de Potsdam e a Universidade de Weimar (Bauhaus).

Houben *et al.* (2008) mencionam o sucesso de uma pedagogia educacional levada a cabo no CRATerre, no âmbito da construção em terra, constando de um workshop científico com mais de 150 experiências interactivas de cariz altamente intuitivo, que em apenas 4 anos já tinha sido frequentado por 11.000 visitantes. Nalgumas Universidades é aliás frequente a utilização de trabalho “*in situ*” como uma componente indispensável da aprendizagem da construção em terra.

A título de exemplo nos Estados Unidos, os alunos do Departamento de Arquitectura e Planeamento da Universidade do Utah, projectam e constroem todos os anos gratuitamente no âmbito do programa Design Build Bluff, habitações de cariz marcadamente sustentável para os membros Tribo Navajo (Figura 1.12).



*Figura 1.12: Parede de Trombe em taipa construída no âmbito do programa Design Build Bluff*

Também nos Estados Unidos, na Escola de Arquitectura de Austin, Universidade do Texas, um grupo de 12 estudantes projectou e construiu um banco de jardim em taipa (base e topos em betão), sendo esse um trabalho inserido na Disciplina / Workshop “Advanced Architectural Studio” (Figura 1.13).



*Figura 1.13: Construção de banco de jardim: a) Compactação da taipa; b) Execução do topo do banco com betão; c) Aspecto final.*

Em Portugal não tem havido, infelizmente, um movimento em torno da construção em terra como uma força similar à que tem lugar nos já referidos países, este facto é tanto mais paradoxal se atendermos às condições climatéricas favoráveis do nosso país e ao facto deste tipo de construção fazer parte do nosso património edificado. Apesar disso, deve em abono da verdade reconhecer-se que Portugal tem assistido nos últimos anos a um crescente interesse pela construção em terra. Este interesse é bem patente não só no crescente número de Teses produzidas no seio da comunidade

académica, como também nas Conferências e cursos de formação que nos últimos anos tem tido lugar no nosso país.

Para além daquilo que é a integração do tema da construção em terra ao nível curricular, o que tem acontecido fundamentalmente ao nível das disciplinas de Materiais de quase todos os cursos de Arquitectura, existe ainda ensino profissional neste âmbito, levado a cabo em diversas instituições a saber (Jorge *et al.*, 2005):

- Cenfic;
- Escola-Oficina de Alcácer do Sal;
- Escola-Oficina de S.Luis;
- Escola Profissional de Serpa;
- Escola Profissional de Mértola;
- Escola Profissional de Odemira

A blogosfera tem também sido palco para a divulgação de algumas obras/eventos/experiências sobre a construção em terra, as quais tem permitido uma interacção directa com o público através de workshops durante a realização das mesmas, aqui se salientando o projecto “Colunas de Terra”, da Associação Barafunda na zona da Benedita (Figura 1.14).



Figura 1.14: Estrutura para realização de eventos com colunas de terra

A dinâmica formativa à volta construção em terra e mesmo o entusiasmo com que novas gerações de audazes e desempoeirados Arquitectos encaram este tema, ainda não encontra correspondência ao nível do sector da construção civil. Ainda assim é importante não deixar de referir, que apesar de constituírem uma percentagem sem grande expressão em termos do mercado imobiliário, vão já tendo lugar várias obras de construção em terra no Alentejo e Algarve (Figura 1.15), sendo que a sua incidência se faz sentir mais nas proximidades da Costa Vincentina.



*Figura 1.15: Construção em terra em Portugal: a) Adegas em Cuba; b) Habitação unifamiliar em Odemira (Parreira, 2007)*

## Regulamentação

São já vários os países que possuem regulamentação no âmbito da construção em terra, o que demonstra bem da forma como esses países levam a sério este tema.

Infelizmente Portugal não é um deles, não sendo aliás errado pensar que essa omissão é em parte responsável pelo incipiente estado de aceitação deste tipo de construção no nosso país. Consequentemente, aos projectistas portugueses, outra solução não resta afim de poderem respeitar a segurança às acções sísmicas do que utilizar uma estrutura sismo resistente e reservar às alvenarias de terra uma função meramente de compartimentação.

### **Alemanha**

Na Alemanha, datam de 1944, as primeiras regras técnicas sobre a construção em terra (Earth Building Code). Contudo, devido às consequências da guerra, só em 1951 é que as mesmas passaram a ser efectivamente aplicadas com impacto normativo, como DIN 18951. Em 1971, apesar de terem sido revogadas por obsoletas continuaram no entanto a ser utilizadas como regras de boa arte. Em 1997 e 1998, um projecto da Fundação Alemã para o Ambiente, elaborou um conjunto de recomendações técnicas para a construção em terra, que continham um estudo relativo ao estado da arte da construção em terra, as quais vieram a ficar conhecidas por "*Lhmbau Regeln*" (Schroeder *et al.*, 2008). Estas disposições regulamentares passaram com o tempo, a ser aplicadas em quase todos os estados alemães, com excepção de Hamburgo e da Baixa-Sáxonia. De acordo com os referidos autores, as "*Lhmbau Regeln*", constituem ainda hoje na União Europeia, o único conjunto de normas com alguma coerência no domínio da construção em terra. Tendo inclusive sido adoptadas na sua íntegra por outros países. Em Fevereiro de 2008, foi aprovada uma revisão do "*Lhmbau Regeln*", tendo essa nova versão sido submetida para certificação pelos organismos europeus sedeados em Bruxelas, o que aconteceu em Julho de 2008.

### **Austrália**

A Austrália foi a par da Alemanha, um dos primeiros países a ter um regulamentação específica sobre a construção em terra. A mesma foi publicada em 1952 pela Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) com a designação de “Bulletin 5”, tendo sido objecto de sucessivas reedições em 1976, 1981, 1987 e 1992. Este regulamento representou até há bem pouco tempo as bases para o projecto da construção em terra, nas variantes de adobe, taipa e BTC. Reconhecendo a necessidade de um documento mais completo e mais actual do que o “Bulletin 5”, foi publicado em 2002, o Manual de construção em terra Australiano. O referido documento reúne um conjunto de recomendações sobre as boas práticas da construção em terra, sendo composto por 6 capítulos com o seguinte conteúdo (Maniatidis & Walker, 2006):

- 1º - Resenha histórica, vantagens e desvantagens;
- 2º - Materiais e técnicas construtivas;
- 3º - Detalhes construtivos, construção e manutenção;
- 4º - Requisitos de desempenho para a durabilidade e segurança estrutural;
- 5º - Projecto de fundações;
- 6º - Controlo de qualidade, formação profissional e mecanização.

### **Espanha**

Em 1992 o Ministério dos Transportes e Obras Públicas publicou um documento de apoio ao projecto e construção de edifícios em terra intitulado “*Bases para el Diseno y Construction com Tapial*”, o qual dá especial importância à construção em taipa embora também contenha referências ao adobe, sendo o mesmo composto por 5 capitulos (Maniatidis & Walker, 2006):

- 1º - Resenha histórica da taipa e do adobe;
- 2º - Princípios para o projecto de paredes de terra;
- 3º - Técnicas de construção para taipa;
- 4º - Fundações;
- 5º - Controlo de qualidade

Delgado & Guerrero (2006) referem contudo que a construção em terra não se encontra regulamentada em Espanha, pelo que isso coloca vários inconvenientes como por exemplo o relacionado com a necessidade de fazer um seguro para cobrir eventuais obras dentro do prazo da garantia imposta por lei que é de 10 anos.

### **Estados Unidos**

Os Estados Unidos possuem três regulamentos para o sector da construção de edifícios, os quais cobrem acções específicas consoante a zona do país, tornados no Sudeste, vento e neve no Norte e acção sísmica nos Estados do Oeste. Nenhum dos referidos regulamentos abrange a construção em terra, mas o regulamento relativo à acção sísmica tem sido usado para este tipo de construção. Neste país importa no entanto referir que o Estado do Novo México tem desde 1991 um regulamento estadual para a construção com adobe e taipa, o qual contém indicações para a selecção de solos e para o teor de água e estabelece ainda requisitos em termos de métodos de construção e da cofragem a utilizar (Maniatidis & Walker, 2006).

### **Nova Zelândia**

De acordo com Parreira (2007) o regulamento utilizado neste país para a construção em terra é um dos mais completos a nível internacional, tem força legal e está estruturado em três partes:

- NZS 4297:1998 - Engineering Design and Earth Buildings - Estabelece critérios de desempenho em termos de durabilidade, resistência, retracção, isolamento térmico e resistência ao fogo;
- NZS 4298:1998 - Materials and Workmanship for Earth Buildings - Define exigências em termos de materiais e de mão-de-obra;
- NZS 4299:1998 - Earth Buildings not Requiring Specific Design - Aplicável para edifícios com menos de 600m<sup>2</sup> (ou 300m<sup>2</sup> por piso) e estabelece soluções construtivas para as paredes, fundações, lintéis.

Na Nova Zelândia a regulamentação da construção em terra é função da altura dos edifícios. Para alturas inferiores a 3,3m não há necessidade de um projecto específico, embora as alvenarias de taipa neles utilizada deva respeitar o disposto na Especificação NZS 4298:1998. Os edifícios com altura entre 3,3 e 6,5 m devem ser projectados de acordo com a NZS 4297:1998 (Jaquin, 2008).

### **Zimbabwe**

Neste país existe uma Especificação publicada em 2001, que é praticamente uma adaptação de obra “Code of Practice for Rammed Earth Structures” (Keable, 1996), composta por 6 secções:

- 1ª - Materiais;
- 2ª - Cofragens;
- 3ª - Fundações
- 4ª - Projecto das paredes em termos de resistência à compressão, absorção de água e erosão.
- 5ª - Estabilidade estrutural das paredes
- 6ª - Pormenores e acabamentos.

## **Perspectivas Futuras**

Caracterizada por baixos consumos de energia e de emissões de carbono, por estar associada a baixos ou quase nulos níveis de poluição e ainda por ser responsável por níveis de humidade interior benéficos em termos da saúde humana, a construção em terra possui assim vantagens competitivas face à construção corrente que lhe auguram um futuro promissor.

No que ao nosso país diz respeito, o futuro da construção em terra passa em primeiro lugar, pelo reconhecimento institucional da importância deste tipo de construção, traduzido em regulamentação própria, em segundo lugar

pelo fomento de uma política formativa que contemple as especificidades técnicas e científicas desta área e permita uma generalização daquilo que já é feito actualmente em termos formativos mas agora à escala nacional. O panorama atrás referido, não é no entanto um exclusivo do nosso país, pois outros autores, referem estrangulamentos similares no desenvolvimento da construção em terra (Shittu, 2008a):

- Falta de trabalhadores qualificados nas artes da construção e reconstrução de edifícios em terra;
- Ausência de instituições que formem profissionais de construção em terra;
- O facto da construção em terra estar associado às camadas populacionais com menos recursos económicos;

Sem que estas condições estejam cumpridas dificilmente, a população civil deixará de olhar para esta construção como sendo algo que só pode contentar aqueles que não tem recursos financeiros para terem uma habitação construída em moldes correntes.

# 2

## Técnicas Construtivas Utilizadas

Considerações Prévias

Taipa

Adobe

BTC

## Considerações Prévias

Existem várias técnicas de construção em terra no mundo inteiro, as quais se podem no entanto subdividir em três sistemas fundamentais:

- monolítica (*in situ*);
- por unidades (alvenaria);
- por enchimento e revestimento.

### Monolítica

A construção monolítica pode ser executada de diversas formas. A taipa, por exemplo, a técnica mais conhecida no nosso país, consiste na compactação de terra húmida num taipal (cofragem de madeira). A terra vazada ou moldada é um processo construtivo que recorre ao uso de cofragens à semelhança da taipa, mas é utilizada terra num estado mais plástico e sem compactação.

Outro processo, mais actual, é a terra armada com aço á semelhança do betão, mas recorrendo a uma cofragem perdida em madeira pelo interior e terra projectada pelo exterior, sendo devidamente regularizada a superfície (Figura 2.1).



Figura 2.1: Técnica monolítica de terra projectada

A terra empilhada ou “Cob” realiza-se, como o próprio nome indica, pela colocação da terra por empilhamento, normalmente com adição de palha, e uma posterior regularização da superfície. Esta técnica potencia a criação de paredes com um carácter mais escultural.

Em Portugal teve início recentemente o recurso a uma técnica monolítica, com a designação de “Barrocal”, a qual faz uso de terra, cal e palla misturadas em betoneira tradicional de eixo inclinado. A mistura é posteriormente colocada no interior de uma cofragem e compactada com vibradores de agulha correntemente utilizados na execução de betão.

### **Por Unidades**

Na execução de paredes em alvenaria de terra são utilizados diferentes tipos de unidades pré-fabricadas, como sejam o adobe, o bloco de terra compactado (BTC), os blocos de terra recortada ou terra extrudida.

O adobe é um bloco produzido mediante a moldagem de terra plástica, podendo ter um processo manual ou mecanizado.

O BTC produz-se pela prensagem da terra no seu estado húmido, podendo ter um processo de fabrico mecânico ou hidráulico.

Os blocos extrudidos consistem no fabrico de unidades obtidas por um processo de extrusão utilizando terra plástica. Os blocos em terra recortada são obtidos pelo recorte do bloco directamente da terra no seu estado natural e sólido, desde que o tipo de terra tenha uma resistência mecânica. A terra extrudida consiste num método de fabrico por extrusão que permite obter não só blocos para alvenaria, mas também placas pré-fabricadas que podem ser aplicadas como revestimento de paredes.

## Por Enchimento e Revestimento

Entre estas técnicas encontra-se o tabique ou taipa à galega, também designada por taipa de mão, pau a pique ou barro armado no Brasil, por “*torchis*” na França, ou por “*Wattle and Doub*” no Reino Unido. Esta técnica consiste em colocar terra, no seu estado plástico e ou cal, sobre um suporte engradado de madeira cana ou vime (Figura 2.2).



*Figura 2.2: Paredes de terra sobre engradado em madeira*

Existe ainda uma variante que passa pelo enchimento de terra entre uma parede dupla de alvenaria de pedra ou tijolo, técnicas de revestimento de paredes em terra, bem como o revestimento de coberturas. As técnicas mais utilizadas e que serão neste capítulo abordadas com maior detalhe são a taipa, o adobe e o bloco de terra compactado.

# Taipa

A taipa é uma técnica de construção monolítica que consiste na compactação de um solo de consistência de terra húmida. Designada por “pise” na França e “tapial” na Espanha, a técnica da construção em taipa encontra-se disseminada a nível mundial e muitas dessas construções já fazem parte do património mundial da UNESCO.

Em França, na cidade de Lyon, existem alguns edifícios com mais de 300 anos ainda habitados. Na Alemanha ainda permanece habitada uma construção em taipa de 1795 e um edifício de 1828 em taipa ainda permanece de pé, sendo considerado o edifício em taipa mais alto da Europa (Figura 2.3).



*Figura 2.3: Edifício de 6 andares construído em taipa, Weilburg, Alemanha (Minke, 2006)*

Em Portugal, até aos anos 50, a taipa era a técnica construtiva mais utilizada no centro e sul do país (Ribatejo, Alentejo e Algarve). Nas últimas décadas, a taipa e o adobe, têm sido substituídos pelo tijolo de barro furado de

produção industrial, contudo verifica-se um pior comportamento térmico dos edifícios correntes em relação às espessas paredes de taipa tradicional. (Correia, 2000).

A taipa é um método que requer pouca quantidade de água e por essa razão esta técnica encontra-se com mais frequência onde a água não abunda. As paredes em taipa tradicional apresentam muitas vezes a incorporação de outros materiais como reforço quando a terra não tem a propriedades desejadas para a estabilidade das paredes. Entre estes materiais encontra-se o tijolo cerâmico maciço (Figura 2.4), pedra, cortiça ou argamassas nas juntas entre os blocos monolíticos de taipa.



*Figura 2.4: Parede exterior em taipa reforçada com tijolo cerâmico, Serpa, Alentejo*

A forma de construir requer alguma perícia e formação na área, uma vez que necessita de alguns cuidados. Devendo ter-se atenção no fabrico do molde, na selecção da terra, na humidade certa para compactação, a forma de compactar e um especial cuidado no embasamento e remates de cobertura para evitar a penetração de água (Eires, 2008a).

É necessário também o travamento da estrutura para que esta seja estável. Por isso, os cunhais eram reforçados com pedra cruzada nos cunhais ou eram mesmo realizados em alvenaria de pedra. Além disso, o travamento

das paredes em relação ao esforço transversal era realizado pelos contrafortes ou por um reforço por tirantes de aço.

## A Taipa Tradicional

Esta técnica é realizada com recurso a uma cofragem, formada por pranchas de madeira desmontáveis, designada por taipal ou *enxamél*. Em Portugal, a construção em taipa é feita por camadas de 50 de altura, 0,40m a 0,70m de largura e 2m de comprimento. Habitualmente as fundações tradicionais eram executadas em alvenaria de pedra (por exemplo xisto, argamassa de cal e areia, barro e pedra seca), a fim de evitar a ascensão da humidade nas paredes de taipa. Actualmente, ainda se constrói mediante este processo de construção tradicional em pequenas obras. A terra é compactada em camadas de aproximadamente 10 cm, até preencher todo o taipal, este é posteriormente removido e reerguido para a camada seguinte. A forma de encaixe entre camadas na horizontal é recta ou inclinada para melhorar o travamento entre as camadas (Figura 2.5).



*Figura 2.5: Construção em Taipa tradicional, Mumemo, Moçambique  
Foto de Arq. Miguel Mendes (Mendes, 2006)*

A Figura 2.6 a), apresenta um taipal tradicional constituída por dois taipais laterais, duas comportas e quatro costeiros que junto com as agulhas fazem o travamento do molde, mostrando também uma cangueta que se utiliza para unir os costeiros em vez das cordas. Já a Figura 2.6 b) apresenta uma variante em que o aperto é efectuado mediante varões roscados.

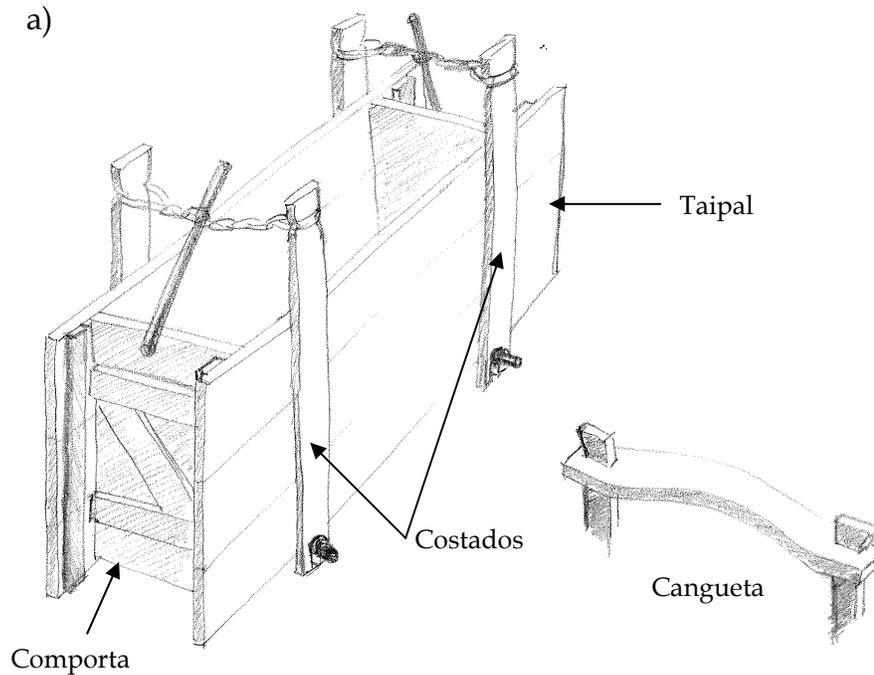


Figura 2.6: Taipal tradicional: a) com aperto por cordas; b) com aperto por varões roscados

A compactação faz-se de forma manual com recurso a peças de madeira, designadas por pilões, maços ou malhos. Este processo de apiloar requer rapidez para que a compactação seja realizada com a terra na humidade correcta para que se obtenha a coesão desejada (Figura 2.7).



*Figura 2.7: Pilões ou maços utilizados na taipa tradicional*

Maniatidis & Walker (2007), resumem recomendações de outros autores sobre as características que deviam respeitar os maços utilizados na construção em taipa (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1:** Características de pilões para taipa (Maniatidis & Walker, 2007)

Ref <sup>a</sup>	Massa do pilão	Forma da cabeça	Material da cabeça	Área da secção da cabeça (cm <sup>2</sup> )	Comprimento do cabo (cm <sup>2</sup> )
1	5-9kg	variável	madeira/metal	64	1,3-1,4
2	5-10kg	circular		50-110	1,5-1,8
3	6,3-8,2kg	cónica	Madeira com acabamento em metal	25-39	1,5
4	7-10kg	prismática	madeira/metal	80-100	1,5-1,8

Estes autores referem que apesar da actividade de compactação ser muito morosa, uma equipa de 3 trabalhadores podia executar 1,5 a 3 m<sup>3</sup> de taipa diariamente somente com recurso a compactação manual.

### A Taipa Mecanizada

Mais recentemente, com o uso das novas tecnologias, desenvolveu-se a taipa mecanizada. Esta é realizada segundo os mesmos moldes que a taipa tradicional, diferindo apenas na qualidade e dimensões da cofragem e no meio de compactação.

A cofragem pode ser móvel ou amovível conforme as dimensões utilizadas, recorrendo a placas e perfis à base de contraplacado de madeira ou de metal (Figura 2.8).



*Figura 2.8: Construção em taipa com cofragens metálicas, Austrália (foto Bill Swaney, Maniatidis & Walker 2003)*

Esta selecção de materiais de cofragem e dimensões dependem da textura que se pretende obter na parede de taipa (Figura 2.9).



*Figura 2.9: Nk'Mip Desert Cultural Centre, Canadá. Arq.s Hotson, Bakker, Boniface e Haden (2007)*

A compactação é realizada através de um compactador pneumático, um pouco à semelhança dos compactadores utilizados na compactação de pavimentos. Deste modo, o tempo necessário para compactar a terra é bastante mais curto que na taipa tradicional, havendo assim uma optimização do tempo de construção. Middleton (1952) sugere pilões mecânicos de cabeça circular com um diâmetro entre 70 e 150mm. Na Figura 2.10, apresenta-se um exemplo de compactação mecânica utilizada na execução de paredes de taipa, numa obra realizada em 2007 no Alentejo.



*Figura 2.10: Compactação de terra por meios mecânicos (Foto da firma Betão e Taipa- Construção de adega, Herdade do Rocim)*

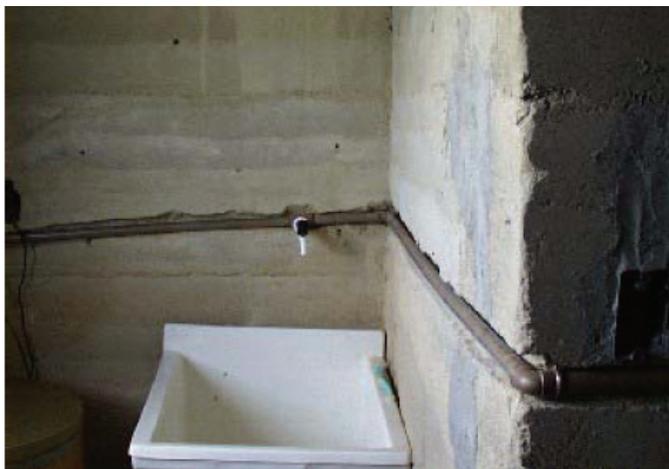
As paredes de taipa podem ser resistentes ou não resistentes, optando-se por utilizar uma estrutura em outro material como o betão ou a madeira. Além disso, estas paredes podem ser reforçadas com bambu ou mesmo o aço, um pouco à semelhança do betão armado. As fundações neste tipo de taipa têm sido executadas em betão armado ou alvenaria de pedra para evitar a ascensão de humidade por capilaridade, tal como na taipa tradicional. Em relação às espessuras mínimas das paredes de taipa, existem diferentes recomendações sobre este assunto as quais revelam valores bastante díspares. Segundo Schroeder *et al.* (2008), as especificações alemãs, “*Lehmbau Regeln*”, exigem que as paredes resistentes devem ter uma largura mínima de 36,5 cm, baixando esse valor para 32,5 cm no caso de paredes de taipa.

Shittu (2008) refere que as especificações técnicas utilizadas na Nigéria, recomendam larguras mínimas de 22,5 cm e 11,3 cm, consoante as paredes de adobe sejam ou não resistentes.

Para se determinar a largura ideal de uma parede, o CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, realizou uma série de ensaios, entre os anos 70 e 90, tendo concluído que para uma mistura com aproximadamente 6%

de cimento e pé direito até 2,80 metros a espessura poderá ser de 12 cm, atendendo as condições de resistência e estabilidade (Soares *et al.* 2004)

Em relação à instalação de redes de água nas paredes em taipa Lourenço (2002) desaconselha vivamente a utilização de redes de abastecimento de águas embutidas nas alvenarias da construção em terra, para facilitar a sua manutenção e também pelo facto de eventuais fugas poderem contribuir para a degradação da alvenaria. Esta situação embora compreensível de um ponto de vista técnico, coloca no entanto questões mais ou menos óbvias de um ponto de vista estético, pois embora esta opção possa eventualmente ser aceitável para construções de baixo custo já não o é quando se pretenda uma construção do segmento médio-alto. Outros autores referem mesmo a utilização um procedimento inverso (Figura 2.11).



*Figura 2.11: Abertura de roços para passagem da rede de abastecimento de água (Soares et al., 2004)*

Existem porém soluções mais astutas para contornar esta dificuldade em incorporar tubagens. É possível incluir tubagem apenas em paredes interiores que não tem de ser em taipa e também temos o exemplo do famoso perito de construção em terra austríaco, Martin Rauch, que na sua própria casa utilizou uma câmara-de-ar realizada com canas revestidas de argila onde passam tubagens para aquecimento de ar (Eco, 2009).

## Adobe

Adobe é uma técnica de construção com simplicidade de fabrico e edificação e talvez por essa razão a maioria das construções em terra antigas, muitas delas ainda habitadas actualmente, foram feitas em adobe. O termo adobe deriva do árabe “attob” e significa tijolo seco ao sol (Rogers & Smalley, 1995). Este facto leva a pensar que esta técnica terá sido introduzida na Península Ibérica durante a ocupação árabe. No Sul de Portugal são frequentes edifícios de habitação com alvenaria em adobe (solo arenoso e cal), ainda em razoáveis condições de conservação que datam do início do século XX. Pinho (2001) procedeu a um levantamento exaustivo das paredes de edifícios antigos em Portugal, referindo casos invulgares de paredes mistas de adobe e xisto. O seu fabrico consiste na moldagem de pequenos blocos, normalmente utilizando moldes em madeira, desmoldados ainda no estado fresco e colocados a secar à temperatura ambiente (Figura 2.12).



*Figura 2.12: Produção manual de adobes*

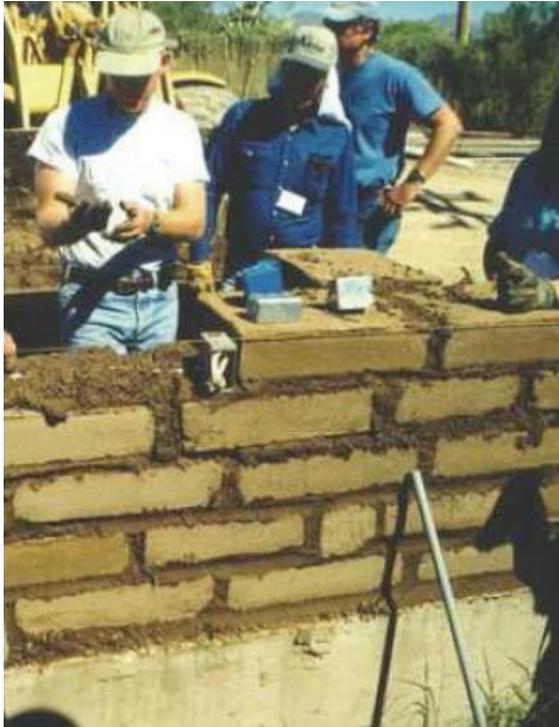
Existem diversos formatos e dimensões de blocos de Adobe. Podem ser fabricados blocos simples ou com encaixe macho-fêmea para melhor travamento da parede e tijolos de  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{3}{4}$ . Quanto às dimensões, temos o exemplo do México onde se utilizam adobes de 38x38x8cm, 39x18x18cm e

40x20x15cm (Williams-Ellis & Eastwick-Field, 1950). No Egito, Hassan Fathy indica as medidas de 25x15x6cm e o CEPLAC (Centro de Pesquisas do Cacau em Itabuna) utilizou em uma pesquisa os formatos de 23x11x7 e 23x11x10cm (Lavinsky *et al.*, 1998).

A técnica de construção em adobe requer o uso de um solo plástico e argiloso, por isso é sobretudo utilizada em locais onde é possível encontrar água. A utilização de solo argiloso leva ao aparecimento de fissuras quando o adobe seca devido à retracção do material. Por isso, é costume reforçar o adobe misturando palha ou outras fibras vegetais para evitar este comportamento.

Relativamente à introdução de fibras na mistura existem diferentes apreciações. Neumann *et al.* (1984) afirmam que controla a microfissuração, já outros autores pelo contrário contestam que as fibras podem apodrecer com o tempo e formar canículos que diminuem as resistências dos adobes (Milanez, 1958). Para contornar este problema Freire & Ramirez-Sarmiento (1997) citados por Correia *et al.* (2006), utilizaram fibras de bagaço de cana-de-açúcar desmeduladas e tratadas com silicato de sódio e sulfato de alumínio, tendo sido misturadas a argamassa de cimento e areia, tendo observado um aumento da sua resistência mecânica.

A forma de construir em adobe é igualmente simples, semelhante à colocação do tijolo convencional formando uma alvenaria (Figura 2.13). O assentamento dos adobes é realizado com argamassa à base de terra a fim de se obter um melhor comportamento de conexão entre os materiais, uma vez que se mantêm o mesmo nível de retracção, evitando-se assim o aparecimento de fissuras ou destacamento de material.



*Figura 2.13: Alvenaria de adobe*

Em termos de estéticos as paredes de adobe podem ficar com os adobes à vista, sem tratamento superficial ou estes podem ser rebocados com uma argamassa à base de terra. Além do adobe convencional realizado à mão, existem outras técnicas para a realização de adobe, como por exemplo, o adobe mecanizado, o “*adobeton*” e o adobe “*in situ*”.

### **Adobe Mecanizado**

Este tipo de adobe faz uso da tecnologia actual, utilizando máquinas semelhantes às agrícolas, o que possibilita um fabrico mecanizado e mais rápido dos blocos (Figura 2.14). Existem aliás duas empresas em Portugal, no Sul do país, que utilizam esta técnica de fabrico e construção.



*Figura 2.14: Produção mecânica de adobes*

### **Adobe com Incorporação de Revestimento em Betão - “Adobeton”**

Esta é uma técnica oriunda de Marrocos e consiste numa tecnologia de construção de paredes exteriores em adobe com protecção à intempérie exterior em elementos de betão prefabricados, em forma de “L” invertido, aumentando a sua durabilidade e dando um aspecto mais industrial à construção em terra (Figura 2.15).



*Figura 2.15: Construção de parede em "Adobeton" (Martin, 1998)*

Esta construção tem a vantagem da durabilidade e satisfação pessoal humana das classes mais baixas que procuram moradias industrializadas, sem o aspecto tradicional das construções em terra. No entanto, esta solução não tem versatilidade em termos arquitectónicos, uma vez que só permite uma construção rectilínea e simples, e além disso consome mais energia no seu fabrico pelo uso de cimento (Jalali, 1999; Martin, 1998).

### ***Adobe In-situ***

Técnica em que os adobes são moldados, *in-situ*, mediante o recurso a uma cofragem semelhante à da taipa. Os adobes podem ser desmoldados de seguida, dando a possibilidade de serem moldáveis permitindo obter diversas formas e texturas ou podem secar no próprio molde, à semelhança do betão, podendo descofrar-se no dia seguinte (Figura 2.16).



*Figura 2.16: Edifícios em adobe moldado in-situ (adobes desmoldados na hora)*

Este último método permite utilizar cofragens de maior dimensão comparativamente às dimensões típicas dos adobes desmoldados na hora (30x30x15cm). A consistência da terra a utilizar é idêntica à dos adobes convencionais, utilizando-se um terra plástica que permite uma facilidade de moldagem e desmoldagem.

## BTC

Esta técnica surgiu de uma evolução do adobe, por estabilização do solo por meios mecânicos, consistindo da prensagem do solo confinado em um molde, permitindo obter pequenos bolos de terra prensada, mais resistente e duráveis em relação ao adobe.

A execução de unidades habitacionais, com alvenarias de BTC é pouco frequente em Portugal, tendo no entanto vindo a aumentar muito pela carga de sustentabilidade que lhe está associada, com a vantagem adicional de apresentarem desempenhos superiores às alvenarias de adobe (Figura 2.17).



*Figura 2.17: Construção de alvenarias com recurso a BTC, Alentejo*

A prensagem da terra é realizada através de uma prensa, accionada de forma manual ou mecanizada, permitindo realizar diversos tipos de blocos, maciços ou perfurados, e placas de revestimento. A consistência da terra utilizada é de terra húmida, semelhante à da taipa, permitindo obter blocos bastante resistentes, embora mais pesados que o adobe. Este tipo de construção permite uma rápida execução, facilidade de montagem e uma diminuição dos resíduos de construção.

A Figura 2.18 apresenta um projecto na Índia que consiste numa pequena casa construída para ser facilmente montada e desmontada. A casa é construída por BTC encaixável, assentados com o mínimo de argamassa à base de terra, e foi montada em apenas 64 horas (Auroville Earth Institute 2008).



*Figura 2.18: "Casa móvel construída em 64horas" projecto de Auroville Earth Institute, Índia*

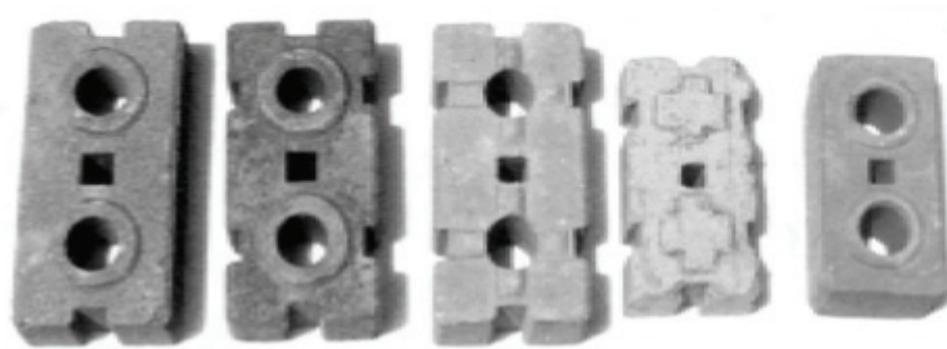
Em termos de estrutura do edifício esta pode ser uma estrutura convencional, em betão ou madeira, ou ser incorporada no próprio bloco perfurado como mostra a figura 2.19.



*Figura 2.19: Construção em BTC com estrutura incorporada*

O BTC, quando fabricado com perfurações, além de permitir o reforço da estrutura, também possibilita a passagem de tubagens sem abertura de

roços, para redes hidráulicas, de telefone e de energia colocadas durante a execução da alvenaria (Figura 2.20).



*Figura 2.20: BTC com encaixes tipo machofemêa: a) Unidades simples; b) Unidades de BTC com instalações eléctricas*

### **BTC em prensa manual**

A primeira prensa manual para compactar blocos de terra, a CINVA-Ram foi criada por Raul Ramirez no *International American Housing Centre* (CINVA) em 1956 (Mukerji & CRAterre, 1988). Nos dias de hoje existem diversas prensas manuais, de diferentes marcas, baseadas neste mecanismo. Na Figura 2.21 é visível a execução de um BTC com a referida prensa.



*Figura 2.21: Execução de BTC com a prensa Cinva-ram: a) Enchimento da câmara com terra; b) confinamento da mistura; c) elevação do BTC; d) retirada do BTC*

As prensas correntes, aplicam pressões da ordem dos 2MPa, embora existam prensas capaz de aplicar pressões superiores, estas tem no entanto o inconveniente de serem bastante pesadas e caras. Estes blocos compactados com recurso a prensas manuais requerem mais mão-de-obra e tempo de fabrico. Tem a vantagem de ser mais económico em termos de consumo energético e a facilidade de transporte para o local da obra, podendo fabricar-se blocos com a terra do próprio terreno.

Segundo Shittu (2008), dependendo do tipo de solo utilizado, nem sempre a aplicação de tensões de compressão, como as obtidas com a prensa Cinva-Ram ou outras similares dá os melhores resultados, acontecendo que por

vezes a acção de compressão tem o efeito pernicioso de se limitar a expulsar a água presente na mistura, podendo levar à desintegração dos blocos.



*Figura 2.22: BTC em prensa mecânica (foto Universidade do Minho)*

### **BTC em prensa hidráulica**

O bloco de terra compactado em prensa hidráulica, não requer força manual, tornando-se num processo de fabrico mais rápido, sobretudo em máquinas que pressam diversos blocos ao mesmo tempo.

Estes blocos apresentam resistências mecânicas substancialmente maiores em relação aos prensados manualmente. Tendo ainda uma maior resistência ao contacto com a água, uma vez que o ajuste entre as partículas é maior, existindo menor quantidade de vazios.

As prensas hidráulicas podem ser fixas ou móveis (Figura 2.24). A mobilidade destas últimas permite a execução dos blocos no local da obra, tal como nas prensas manuais, utilizando a terra do local, com a vantagem

de uma maior rapidez de fabrico. Assim, é possível manter uma maior sustentabilidade deste tipo de construção, evitando o transporte desnecessário e economicamente desvantajoso de blocos.



*Figura 2.23: Prensa hidráulica para fabrico de BTC: a) Fixa (Quintino, 2005); b) Móvel*



# 3

## Caracterização dos Solos

Generalidades

Testes de Caracterização

Propriedades e Classificação

Estabilização

## Generalidades

Em termos gerais, os solos consistem em fases de matéria orgânica (plantas e animais em decomposição) e em fases que resultam da desagregação das rochas, em virtude da acção dos agentes físicos, químicos e biológicos. Contudo o material utilizado como matéria-prima na construção em terra, consiste somente na fase mineral dos solos. Esta fase é constituída por partículas minerais de tamanho variável nomeadamente argilas, siltes e material arenoso as quais se encontram misturadas entre si também em proporções variáveis.

O comportamento de um determinado solo é assim função da quantidade de argilas, siltes e areias, existentes nesse solo e também da quantidade de água presente nesse solo, não só da água livre existente abaixo do nível freático, mas também da água capilar retida nas vizinhanças dos pontos de contacto das partículas sólidas e da água adsorvida, que envolve as partículas com dimensões inferiores a 0,002mm (Correia, 1995). Uma etapa fundamental no conhecimento das propriedades do solo torna por isso necessário que previamente se proceda à sua caracterização com recurso a ensaios específicos para o efeito.

## Testes de Caracterização

A caracterização da fase mineral de um determinado solo é levada a cabo através de uma série de ensaios que permitem quantificar diversos tipos de propriedades, nomeadamente a sua granulometria, o seu comportamento mecânico e o seu comportamento à deformação para um determinado nível de humidade. Esses ensaios podem ser subdivididos, em ensaios expeditos a

realizar a nível de campo com um nível de fiabilidade pouco elevado e em ensaios de laboratório, segundo procedimentos normalizados.

## **Ensaios de campo**

Este tipo de ensaios permite para determinadas situações, algumas conclusões iniciais sobre que tipo de solo existe disponível no local de trabalho, dispensando por isso a realização de ensaios de laboratório, os quais são sempre dispendiosos. Os ensaios que se seguem são uma adaptação de ensaios utilizados pelo grupo francês CRAterre e citados por Eusébio (2001):

### **a) Observação da cor**

A matéria orgânica imprime usualmente aos solos uma cor escura, a qual costuma aparecer nas primeiras camadas de solo. Os solos pálidos significam a presença de areias quartzosas ou feldspáticas. Já os solos com cor vermelha, podem dever essa cor à presença de óxidos de ferro.

### **b) Teste do cheiro**

Um solo orgânico é identificado por um forte cheiro a húmus, o qual é potenciado pelo aquecimento ou humedecimento desse solo.

### **c) Teste do tacto**

Ao esfregar-se uma amostra de solos entre as mãos, percebe-se a presença de um solo arenoso pelo facto de ser áspero. Solos plásticos ou viscosos quando húmidos, indicam elevada quantidade de argilas.

### **d) Teste do brilho**

Uma bola de solo ligeiramente humedecida e recentemente cortada por uma faca, apresentará superfície opaca se houver predominância de silte ou uma superfície brilhante se houver predominância de argila.

### **e) Teste de aderência**

Na bola de terra com que foi executado o teste do brilho, ensaia-se a penetração de uma espátula. Se a penetração é difícil e a terra adere à espátula, trata-se de um solo argiloso. Caso a espátula, entre e saia com facilidade o solo é eminentemente saibroso.

#### **f) Teste de sedimentação**

Com recurso a um frasco com um litro de volume, enche-se até  $\frac{1}{4}$  da sua capacidade com solo e completa-se com água. Agita-se, deixa-se repousar uma hora, e repete-se o procedimento 2 vezes. Posteriormente mede-se a espessura das camadas, de areia, de silte e de argila.

#### **g) Teste visual por peneiração expedita**

Utilizando um solo seco, completamente solto e com recurso a dois peneiros da série ASTM, nº200 (0,074mm) e nº10 (2mm), passa-se o solo no peneiro nº200 e a parte retida neste é passada depois no peneiro nº10. Por comparação do tamanho dos montículos de solo que passam em cada peneiro é possível uma classificação grosseira do solo:

O solo será argiloso se o montículo que passou (areia e silte) no peneiro nº200, for maior que o montículo do solo retido. Se no entanto o montículo de material que ficou retido, for em maior quantidade que aquele que passou está-se em presença de um solo arenoso ou pedregoso. Para a utilização do peneiro nº10, estaremos em presença de solo pedregoso quando o montículo de solo passado for inferior ao retido e será um solo arenoso no caso contrário.

#### **h) Teste de retenção de água**

Faz-se um peneiração de solo por um peneiro com uma malha de 1mm. Com o material retido faz-se uma bola do tamanho de um ovo e junta-se água para a manter unida sem que ela se cole às mãos. Pressiona-se a bola na palma da mão e em seguida golpeia-se fortemente com a outra mão. Se forem necessários 5 a 10 golpes para a água aparecer à superfície e se a bola

ficar esmigalhada, trata-se de um solo composto por areia fina ou silte grosso. Se o mesmo resultado for obtido com 20 a 30 golpes e a bola não ficar esmigalhada, trata-se de um silte ligeiramente plástico ou de uma argila siltosa. Já se não houver nenhuma reacção, trata-se de um solo com elevada quantidade de argila.

#### **i) Teste de resistência à secagem**

Com solo retido num peneiro com malha de 1mm, tomam-se três porções, que são ligeiramente espalmadas de forma a ficarem com 1cm de espessura e 5cm de diâmetro. Em seguida colocam-se essas amostras ao sol para secar. Analisando a dureza do solo, através do seu aperto entre o polegar e o indicador podemos classificar o solo como argila se não se desfizer, como argila arenosa ou siltosa se a amostra se desfizer após alguma esforço e uma areia se o solo se desfizer facilmente.

### **Ensaio de laboratório**

#### **Teor de água**

Ensaio no qual se compara a massa de uma amostra de solo antes e depois de seca numa estufa à temperatura de 105 °C.

#### **Matéria orgânica**

A quantificação da quantidade de matéria orgânica presente no solo, envolve o seu aquecimento a 400 °C, de forma a calcinar a matéria orgânica e por diferença de massas se conhecer a quantidade de material calcinado.

#### **Análise granulométrica**

O ensaio consiste na identificação das percentagens mássicas da fracção arenosa do solo acima de 0,074 mm (peneiro nº200 ASTM), obtidas por peneiração através de uma série de peneiros normalizados. A peneiração é efectuada por via húmida para se obter a desagregação das partículas mais

finas (LNEC E239-1970). O solo retido em cada peneiro é posteriormente seco em estufa, para apurar a percentagem em relação à massa do provete. Para a identificação dos diferentes constituintes do solo abaixo de 0,074 mm (siltes e argilas), utiliza-se não a peneiração mas o ensaio de sedimentação (LNEC E 196-1966). O solo é colocado em suspensão num líquido, para determinar da velocidade de sedimentação a qual é por sua vez função do diâmetro das partículas, através da lei de Stokes. O ensaio passa pelo enchimento de um frasco até  $\frac{1}{4}$  da sua altura com solo e os restantes  $\frac{3}{4}$  com água, ao fim de várias horas mede-se a espessura das várias camadas, sabendo-se que a primeira camada a depositada foi a de saibros, a que se seguem as camadas de siltes e argilas.

### **Limites de consistência**

Também conhecidos como limites de Atterberg, os limites de consistência são constantes físicas permitem inferir para a fracção de solo inferior a 0,4mm, o seu comportamento quando em presença de água. Os limites de consistência determinados pela NP 143-1969, compreendem o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP), o índice de plasticidade (Ip) que se obtém da diferença numérica entre os dois anteriores limites (LL-LP) e ainda o limite de retracção (LR). Houben (1989) referem o parâmetro Retracção relativa obtido da seguinte forma:

$$RR = (LL - LP) (\gamma_{seca} / \gamma_w)$$

Faria (2002) sugere um ensaio designado como “ensaio da caixa”, para avaliação da retracção linear dos solos, o qual utiliza uma caixa que permite a execução simultânea de 5 barras prismáticas de solo com  $60 \times 8,5 \times 3,5 \text{ cm}^3$ , sendo que não são aceites os solos com uma retracção superior a 20mm.

**Limite de liquidez** – teor em água obtido no aparelho de Casagrande, o qual consiste num prato côncavo preenchido com uma pasta de solo, no qual é traçado um rasgo que se volta a unir numa distância de 1 cm após 25 ressaltos.

**Limite de plasticidade** – teor de água de um rolo de terra o qual se separa para um diâmetro de 3mm. Se o rolo se partir com menos de 3mm, tem água a mais e a experiência deve repetir-se com menos água. Se o rolo se partir com um diâmetro superior a 3mm, a experiência deve repetir-se com um teor de água superior.

### Compactação com ensaio Proctor

Ensaio utilizado para determinar o teor de água óptimo o qual corresponde à máxima compactidade do solo (E LNEC 197-1971). Este ensaio utiliza uma fracção de solo inferior a 4,76mm (peneiro nº 4) ao qual se adicionam teores de água crescentes com diferenças de 2%, a qual é compactada em 3 camadas com 25 pancadas por camada, de um aparelho manual (2,49kg e queda de 30,5 cm) ou mecânico (Figura 3.1).



*Figura 3.1: Ensaio de compactação Proctor pesado: a) molde com solo; b) equipamento de compactação*

Regista-se a massa e o volume e num gráfico marca-se a massa volúmica seca versus teor de água, onde posteriormente se retira o teor de água óptimo que corresponde à baridade máxima. Alguns autores defendem contudo que o ensaio Proctor, possui uma baixa energia de compactação o que faz com que o teor de água óptimo seja superior ao recomendado para a compactação de taipa com equipamentos pneumáticos.

Maniatidis & Walker (2003) refere um ensaio para a obtenção expedita do teor de água óptimo através de um “teste de queda”. Neste procedimento prepara-se com a mão uma bola de solo com um determinado teor de água, sendo que esta bola é deixada cair de uma altura de 1,5m. Se após a queda a bola não quebrar, o teor de água é excessivo, se fracturar em vários pedaços o teor de água é baixo.

### **Ensaio de resistência à compressão simples**

A análise da resistência à compressão de provetes de terra (não confinada), é feita de forma similar ao que acontece para o ensaio de betões, tijolos ou outros materiais. O ensaio que consiste em levar à rotura um provete, por aumento da carga axial. Alguns autores recomendam a utilização de um dispositivo mecânico (Figura 3.2), que permite a densificação do solo num provete que é depois ensaiado numa prensa corrente (Jalali, 1991). Trata-se de um ensaio mais expedito e muito mais fácil de realizar do que o ensaio de compactação Proctor.

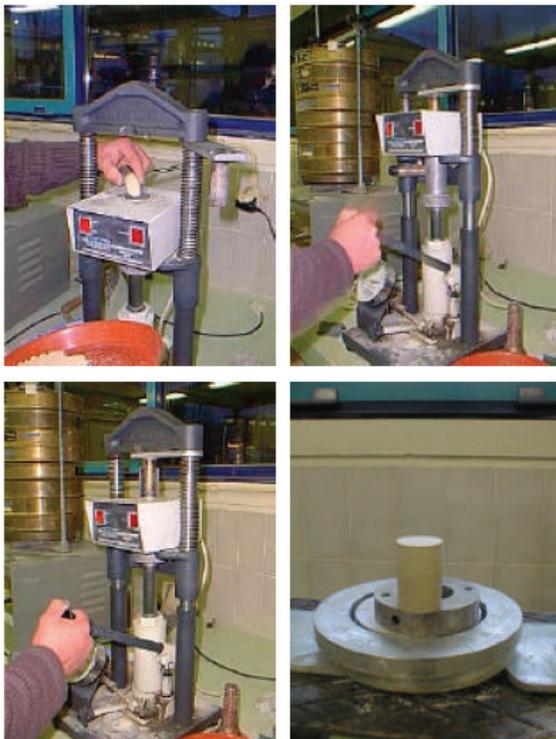


Figura 3.2: Preparação de um provete de 45×30mm para ensaio à compressão simples (Cristelo, 2001)

## Propriedades e Classificação

O grupo CRAterre, referido no trabalho de Doat *et al.* (1979), classifica o solo segundo a sua massa volúmica seca após o ensaio de compactação Proctor, em 4 intervalos que vão do medíocre ao excepcional (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Massa volúmica seca após compactação (Doat *et al.*, 1979)

Massa volúmica seca (kg/m <sup>3</sup> )	Classificação
1650-1760	Medíocre
1760-2100	Muito satisfatório
2100-2200	Excelente
2200-2400	Excepcional

Os mesmos autores recomendam valores para os limites de consistência que devem ser respeitados pelos solos da construção em terra (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2:** Limites de consistência para solos utilizados na construção em terra (Doat *et al.*, 1979)

	Recomendados	Máximos e mínimos
Índice de plasticidade	7-18	7-29
Limite de liquidez	30-35	25-50
Limite de plasticidade	12-22	10-25
Limite de retracção	<Teor água óptimo	8-18

Aqueles autores também apresentam uma classificação para as classes de plasticidade dos solos em função do parâmetro  $I_p$  (Tabela 3.3).

**Tabela 3.3:** Classificação da plasticidade de um solo (Doat *et al.*, 1979)

Plasticidade	$I_p$
Fraca	5-10
Média	10-20
Forte	>20

Para Michel (1976), os solos com mais aptidão para serem estabilizados, apresentam baixos índices de plasticidade. A partir do índice de plasticidade das argilas, define-se uma índice de actividade das argilas ( $A_c$ ) ou índice de Skempton, quanto maior a actividade de uma argila, maior a sua superfície específica e maior a sua expansibilidade e deformabilidade (Tabela 3.4).

**Tabela 3.4:** Grau de actividade de argilas (Doat *et al.*, 1979)

Tipo de argila	$A_c = IP / (\% \text{ argila } < 0,002\text{mm})$
Pouco activa	$A_c < 0,75$
Normalmente activa	$0,75 < A_c < 1,25$
Activa	$1,25 < A_c < 2,0$
Muito activa	$A_c > 2,0$

Houben *et al.* (1989) classificam a retracção do solo em três classes como se apresenta na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5:** Classificação da retracção de um solo (Houben *et al.*, 1989)

Classificação do solo	RR (%)
Susceptível a forte retracção	>70
Retráctil	50-70
Retracção fraca	<50

Na Tabela 3.6 apresentam-se as características de alguns solos utilizados para a construção em terra.

**Tabela 3.6:** Características de solos para construção em terra

	Bahar (2004)	Guettala <i>et al.</i> (2006)
Argilas e siltes (%)	62	36
Areias (%)	38	64
Limite de liquidez (%)	39	31
Índice de plasticidade	15	14
Teor de água óptimo (%)	11	11,8
Mássa volúmica máx. (kg/m <sup>3</sup> )	1760	1877

Motta (1997) analisou a aptidão de solos da zona do Baixo Alentejo para a construção em terra. Na Tabela 3.7 apresenta-se a sua distribuição granulométrica e na Tabela 3.8 os limites de consistência desses solos.

**Tabela 3.7:** Análise granulométrica (Motta, 1997)

	% de argilas <0,002mm	% de siltes >0,002 <0,06 mm	% areias >0,06 <2 mm	% de seixos >2 <60 mm	% de finos argilas + siltes	% de grossos areias+seixos
Albergaria 1	8	10	81	1	18	82
Albergaria 2	8	6	71	15	14	86
S. Susana	14	21	31	34	35	65
Pulo do Lobo	9	39	40	12	48	52
S. Luis	7	7	75	11	14	86
S. Clara	17	11	55	17	28	72
Porto Covo	2	3	3	92	5	95
Barragem Roxo	6	22	23	49	28	72
Messejana	7	23	41	29	30	70

**Tabela 3.8:** Limites de consistência (Motta, 1997)

	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)	Limite de retracção (%)	Retracção relativa
Albergaria 1	Solo não plástico (NP)				
Albergaria 2	19	14	5	14	10
S. Susana	27	21	5	15	21
Pulo do Lobo	26	19	7	14	23
S. Luis	Solo não plástico (NP)				
S. Clara	27	18	9	23	6
Porto Covo	39	31	8	18	32
Barragem Roxo	22	17	5	6	31
Messejana	24	18	6	18	10

Os solos são bastante heterogêneos entre si, havendo solos com mais fracção argilosa (S. Clara e S. Susana) e outros com maior quantidade de areias (Porto Covo e S. Luis). O solo com mais fracção argilosa, é também o solo

com o maior índice de plasticidade (9%), mas também aquele mais susceptível à retracção.

Este autor classifica no entanto os solos analisados como pouco retrácteis, referindo que isso sucede para valores da retracção relativa abaixo de 50%, o que quer dizer que os solos aqui apresentados da zona do Baixo Alentejo não são do tipo retráctil. O solo de S. Clara que tem a maior percentagem de material argiloso, apresenta o maior índice de plasticidade

**Tabela 3.9:** Ensaio de compactação Proctor (Motta, 1997)

	Teor água óptimo (%)	Baridade seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )
Albergaria 1	10,5	1,89
Albergaria 2	11,1	1,88
S. Susana	15,9	1,72
Pulo do Lobo	10,4	1,91
S. Luis	12,0	1,86
S. Clara	22,5	1,55
Porto Covo	12,3	1,52
Barragem Roxo	10,2	1,96
Messejana	14,5	1,72

Segundo as Directivas da CRAterre, os solos com teores de água óptimos entre 9-17% são os mais fáceis de estabilizar (Lourenço, 2002), pelo que à excepção do solo de S.Clara todos os outros se inserem no intervalo referido.

Já Bahar *et al.* (2004) recomendam um intervalo mais restrito para o teor de água óptimo entre 9,5-11%. Hall & Djerbib (2004) referem que a norma NZS 4298 recomenda que na construção em taipa deve variar entre um mínimo de 3% abaixo do teor de água óptimo e um máximo de 5% acima.

Em princípio, a terra de qualquer jazida pode ser usado para a confecção de paredes, blocos e tijolos. Os mais indicados são os solos que possuem 50% a 70% de teor em areia em sua composição. A quantidade de água adicionada à mistura varia conforme o tipo de solo a usar, quanto mais argiloso for o solo, maior a necessidade de água.

Para a construção em adobe, Doat *et al.* (1979) recomendam os seguintes valores para a constituição do solo:

55-75% de areia;

10-28% de silte;

15-18% de argila;

<3% de matéria orgânica

Barbosa (2002) recomenda para os BTC, limites para a constituição do solo que não diferem muito dos anteriores:

50-70% de areia;

10-20% de silte;

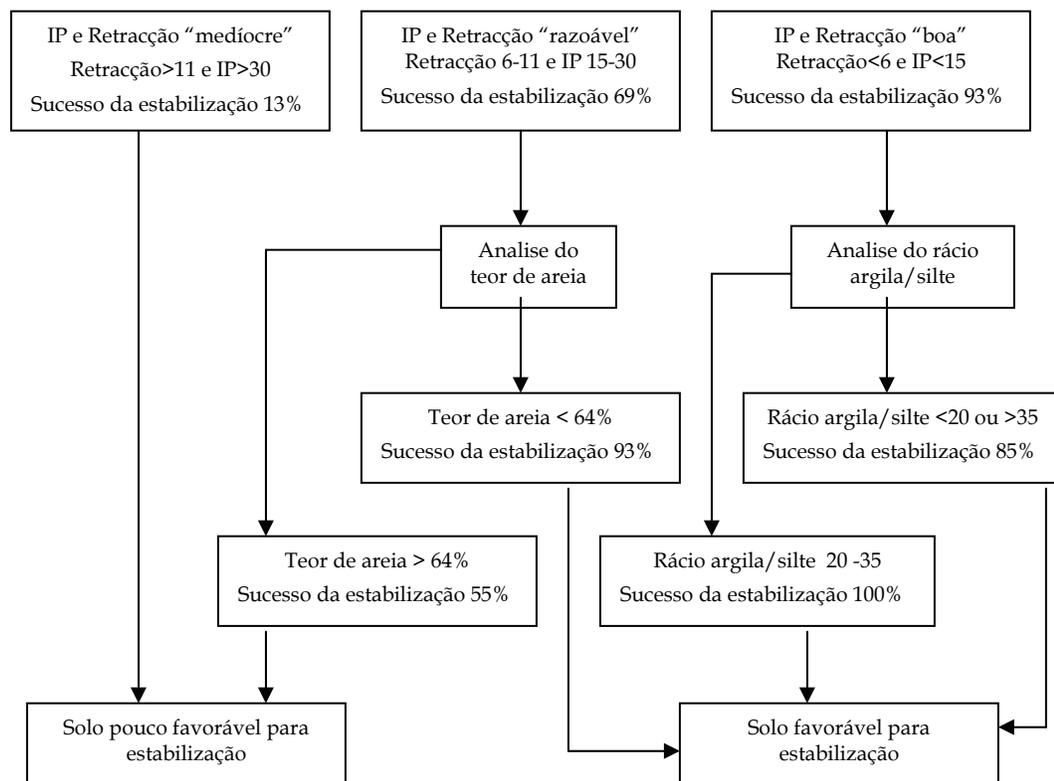
1-20% de argila

Brito (2006) cita o trabalho dos investigadores Maniatidis & Walker (2003), os quais analisaram as proporções recomendadas para a constituição do solo utilizados para a construção em taipa. Os mesmos concluíram que para a estabilização com cimento os solos devem, ter mais de 50% (de preferência 75%) de areias e britas e baixas percentagens de argila, inferiores a 20%. Este autor refere que os elementos com dimensão acima de 5-10mm devem ser retirados e que deve haver um mínimo de 20-25% de argilas e siltes, suficientes para terem função colóide.

Delgado & Guerrero (2007) referem que independentemente da técnica construtiva utilizada os solos devem possuir um mínimo de 5% de argila. Sendo que em termos gerais a revisão de literatura levada a cabo por aqueles

autores refere um valor entre 10 a 20% para a execução de BTC e entre 10 a 15% para a construção em taipa. Já o teor de silte deve variar entre 10 a 25%. Jayasinghe & Kamaladasa (2007) referem reduções substanciais da resistência a compressão de solos lateríticos estabilizados com cimento, quando a percentagem de finos (argilas e silte) é superior a 40%. Sugerindo que essa percentagem não deve exceder 30% (Perera & Jayasinghe).

Burroughs (2008) analisou 104 tipos de solo, os quais foram estabilizados com cal ou cimento num total de 219 estabilizações. Este autor utilizou como critério de validação da aptidão do solo para ser estabilizado, a obtenção de uma resistência à compressão superior a 2MPa.



*Figura 3.3: Metodologia para aferir a aptidão de um solo para ser estabilizado*

(Burroughs, 2008)

## Correcção granulométrica

Quando os solos não apresentem as características mais favoráveis para a construção em terra, podem ser objecto de adição com outros solos com vista à obtenção de um solo com as características pretendidas. Assim se o solo for muito argiloso e muito plástico, poderá ser lhe adicionado material arenoso, já se for um solo muito arenoso poderá ser objecto de correcção com material fino.

Quando um solo contém uma elevada quantidade de elementos grossos, bastará peneirá-lo com um peneiro de malha igual à dimensão que convenha. Contudo se o solo tiver demasiados elementos finos, a solução poderá passar por uma operação de lavagem, o inconveniente desta operação está associado ao facto de se poderem retirar a quase totalidade dos finos, pelo que é preferível a adição com um solo arenoso. Quando o solo tenha uma granulometria descontínua, a sua melhoria envolve a adição de elementos com as dimensões em falta.

## Estabilização

A estabilização ou melhoramento de solos consiste numa alteração das características dos solos de maneira a melhorar o seu comportamento mecânico ou físico. Os métodos para a estabilização de solos para a construção em terra subdividem-se basicamente em:

- Estabilização mecânica em que se procuram melhorar as características dos solos através duma melhor arrumação das suas partículas sólidas e/ou recorrendo a correcções da sua composição granulométrica;
- Estabilização química em que as características dos solos são modificadas através de aditivos (cal ou cimento ou outros aditivos).

Anger *et al.* (2008) analisam a questão do mecanismo de coesão do material terra. Segundo estes autores, um dos responsáveis pela coesão é a água, devido à sua tensão superficial. Já a matriz argilosa é constituída por partículas microscópicas lamelares cuja coesão se deve a ligações capilares de dimensão nanométrica. Sendo que a estabilização óptima deve ocorrer em duas etapas: em primeiro lugar deve haver dispersão das argilas por indução da repulsão electrostática a fim de minimizar o teor de água e reduzir a porosidade final e em segundo lugar, após a adequada organização e estruturação das argilas é que deve ter lugar o mecanismo de ligação (reação pozolânica, geopolimerização, oxidação ferrosa).

Os mesmos autores, referem a existência de vários cimentos disponíveis na natureza, como o betão silicioso “silcrete” que resulta da dissolução e reendurecimento da sílica ou o betão ferroso “ferricrete” que resulta da aglomeração de areias e outros agregados pela acção do óxido de ferro devido à oxidação de soluções de percolação contendo sais de ferro

A estabilização de solos para construção em terra pode incluir fibras naturais (Ghavami *et al.*, 1999) ou artificiais (Binici *et al.*, 2005) ou até mesmo excrementos de animais (Ngowi, 1997). O conceito de melhoramento ou estabilização dos solos através de reacções químicas entre as partículas de solo, a água dos vazios e os materiais adicionados é semelhante tanto para o cimento como para a cal, porém os efeitos da estabilização com cal são mais rápidos do que os da estabilização com cimento (Cristelo, 2001).

### **Estabilização com cal**

Ao misturar cal num solo húmido ocorrem várias reacções químicas que provocam a aglutinação das suas partículas e modificação das suas características. As reacções mais importantes durante o processo de estabilização com cal são agrupadas da seguinte forma:

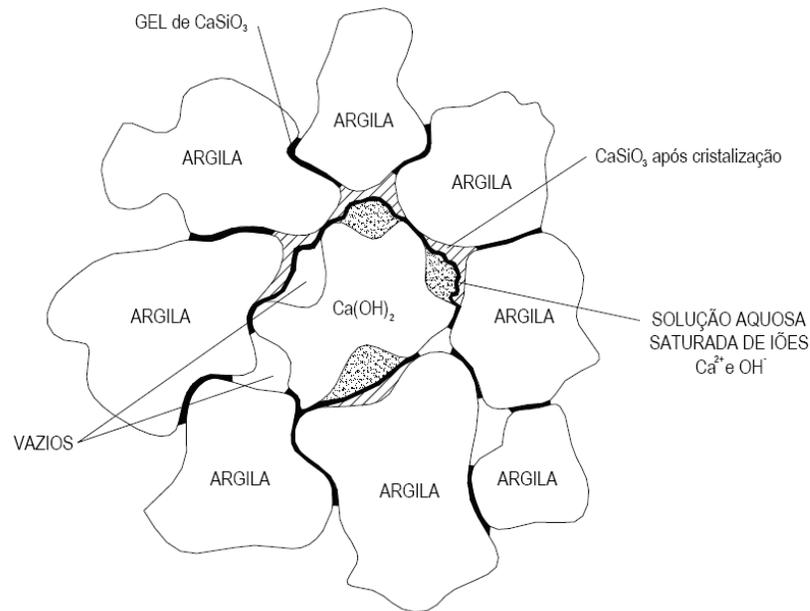
- Permuta iónica e floculação.
- Acção de cimentação (ou reacção pozolânica).
- Acção de carbonatação.

A permuta iónica faz com que os catiões  $\text{Ca}^{2+}$  se adsorvam à superfície das partículas diminuindo a sua electronegatividade e promovendo a floculação. A acção dos iões cálcio, inicia-se logo após a adição de cal ao solo plástico, deixando a mistura húmida solta a curar (processo este também chamado de apodrecimento, devido ao cheiro que se desenvolve), há uma diminuição da plasticidade, o solo torna-se friável e facilmente se desagrega.

A argila, agora formada por partículas de maiores dimensões, perde plasticidade, coesão e expansibilidade, e aumenta a sua trabalhabilidade. Para atingir estes benefícios, basta utilizar uma pequena quantidade de cal.

A acção de cimentação exige bastante tempo, sendo por isso uma reacção lenta, o que a torna responsável pela acção a longo prazo da cal na estabilização. É designada por reacção pozolânica e acontece sob condições climáticas quentes, podendo ser acelerada com recurso a aditivos adequados. Promove a formação de silicato hidratado de cálcio e/ou aluminato de cálcio pela reacção entre a cal, a sílica e a alumina livres nas partículas de argila.

A interacção entre a cal e a argila dissolve a sílica e a alumina das partículas de solo em ambiente de pH elevado, criado pelas moléculas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Os materiais dissolvidos combinam-se com os iões cálcio, compondo produtos cimentícios que interligam as partículas argilosas (Figura 3.4).



**Figura 3.4:** Formação de material cimentício numa mistura solo-cal (Cristelo & Jalali, 2008)

Finalmente a reacção de carbonatação é a reacção da cal com o dióxido de carbono da atmosfera. Consiste na alteração química dos minerais argilosos devido à reacção do ião carbonato ou bicarbonato com qualquer substância mineral, principalmente com iões cálcio dos minerais, formando carbonato de cálcio. Esta é a reacção inversa da produção de cal a partir do calcário, e deve ser evitada uma vez que os carbonatos de cálcio e magnésio formados prejudicam a reacção pozolânica, impedindo o alcance da resistência desejada (Castro & Serafim, 1974).

A identificação das propriedades físico-químicas da cal é essencial para a sua aplicação na estabilização de solos. Uma das principais propriedades a ter em conta é a granulometria, uma vez que influencia várias propriedades da mistura solo-cal, como por exemplo a velocidade de hidratação, o peso volúmico e também a homogeneidade. A granulometria da cal é condicionada pela granulometria da rocha calcária, pelo processo de calcinação, pelo produto obtido (cal viva ou cal apagada) e por possíveis

moagens suplementares devido às diferentes utilizações que podem ser atribuídas à cal.

O conhecimento da superfície específica da cal, pode ser útil para a avaliação do grau de homogeneização e de reacção da cal com o solo e com a água, pois maiores superfícies de contacto dão origem a misturas mais equilibradas. A estrutura porosa das partículas de cal faz com que a superfície exterior esteja em contacto com a água mas, através dos fenómenos de absorção e adsorção, também uma parte interior da sua superfície é envolvida pela água.

A reactividade revela a rapidez da acção da cal depois da aplicação e a eficiência da sua acção estabilizante. Esta propriedade permite antecipar a duração das reacções e, se estas forem exotérmicas, o aumento da temperatura produzia. Para a realização de uma mistura solo-cal para modificação ou estabilização de solos, é necessário encontrar o teor em cal mais adequado para a situação em estudo e depois determinar as propriedades da mistura e a sua alteração ao longo do tempo.

O teor óptimo em cal, depende da futura aplicação do material estabilizado, pois há uma grande variedade de teores, que podem ser adoptados em função das propriedades requeridas. Estas podem ter como objectivo a diminuição da plasticidade e o aumento da trabalhabilidade – melhoramentos – ou a realização de alterações definitivas com efeitos na resistência da mistura – estabilizações.

Para a dosagem das misturas solo-cal determinam-se, os limites de consistência, a granulometria e a classificação e realizam-se ensaios de compactação, resistência e durabilidade, para cada solo. Para a escolha final da mistura realizam-se ensaios de resistência e durabilidade, todavia os critérios mínimos adoptados são variáveis. Em climas frios, por exemplo, a durabilidade é a maior exigência (Castro & Serafim, 1974).

O teor em cal a usar na estabilização dos solos, deve ser sempre da ordem de 1 a 10% contudo, deve ser determinado em cada caso. A utilização de quantidades superiores não é económica nem necessária, mas nunca se deve utilizar menos de 3%, pois mesmo que em laboratório se tenha obtido as modificações pretendidas com um teor inferior, as condições de mistura na obra são sempre mais imperfeitas.

As dosagens para as misturas solo-cal baseiam-se em várias características, sendo que as principais são: o limite de consistência, a granulometria, a classificação, a compactação, a resistência e a durabilidade. Por vezes, também se podem ter em conta outras características como o pH, a composição mineralógica, a expansibilidade, o teor em matéria orgânica e sulfatos e a capacidade de permuta iónica. A modificação de solos tem como objectivo a redução da plasticidade, a melhoria da trabalhabilidade e da resistência à desfloculação e à erosão, o aumento da resistência ao corte e a redução do potencial de variação de volume.

A estabilização com cal é sobretudo indicada para os solos com fracção fina muito plástica e expansiva. O material inicia o processo de cimentação, fortifica e torna-se mais granular, podendo assim considerar-se um material agregado com partículas de maiores granulometria e ângulo de atrito. A estabilidade assim alcançada melhora a resposta dos solos em relação aos movimentos de assentamento ou deslizamento, possibilitando a sua utilização em aplicações estruturais.

Para que uma mistura solo-cal tenha um bom comportamento em obra, deve ter características satisfatórias, sendo estas permanentes e resistentes às acções de meteorização, e deve também ser convenientemente aplicado.

Quando os teores em cal usados são elevados, a durabilidade das misturas é maior, sendo por isso recomendado por alguns técnicos que se utilize no

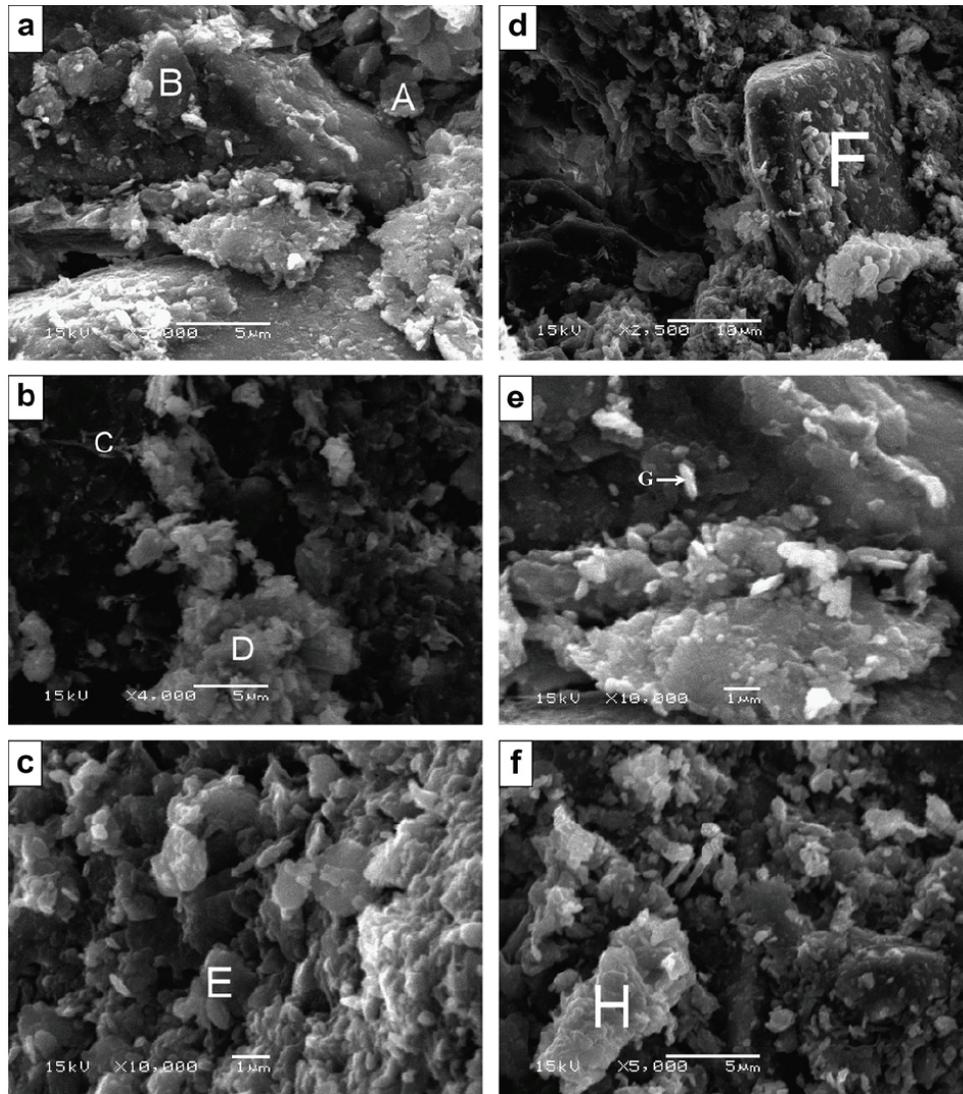
mínimo 5% de cal, mesmo quando uma quantidade menor alcance a resistência necessária (Castro & Serafim, 1974).

Cristelo (2001) estudou a estabilização de solos com cal concluindo que a utilização de adições residuais de cloreto de sódio é mais vantajosa que o aumento do teor de cal, este autor observou que a adição de 0,12% de cloreto sódio equivale a um aumento da adição de cal de 4%.

Millogo *et al.* (2008) estudaram a influência da adição de cal a solos argilosos para fabrico de blocos de adobe, concluindo que a utilização de 10% de cal maximiza a resistência à compressão e minimiza a absorção de água dos blocos de adobe.

De acordo com aqueles autores, a adição de percentagens crescentes de cal induz a formação de compostos visíveis ao nível da microestrutura de calcite e fases de CSH (Figura 3.5 c zona E), formadas a partir da reacção entre a cal e o quartzo (sílica) do solo. Já quando a percentagem de cal sobre para 12% há lugar à formação de portlandite (Figura 3.5 f zona H).

Eires & Jalali (2007, 2008a) avaliaram a possibilidade de execução de BTC com solo arenoso, estabilizado com misturas de metacaulino e cal hidratada, concluindo que as percentagens mais adequadas são 75% para o metacaulino e 25% para a cal. Estes autores concluíram ainda que a adição de determinados aditivos permite maximizar a durabilidade mecânica e a resistência a bactérias e fungos.



*Figura 3.5: Microestrutura de blocos de adobe com cal: a) Sem cal; b) com 4% de cal; c) com 6% de cal; d) e e) 10% de cal; f) com 12% de cal (Millogo, 2008)*

### **Estabilização com cimento**

A estabilização de um solo por adição de cimento consiste na preparação de uma mistura homogênea de solo pulverizado, cimento e água, em proporções determinadas, em que a ação estabilizante do cimento pode ocorrer segundo dois mecanismos distintos, consoante o teor que é adicionado ao solo (Cruz& Jalali, 2009).

Um dos mecanismos permite o aumento da resistência mecânica devido à acção aglutinante do aditivo, que cimenta as partículas de solo. Este efeito verifica-se quando os teores em cimento são mais elevados, em que o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo (Figura 3.6a).

Para teores em cimento mais baixos, verifica-se fundamentalmente uma modificação da fracção argilosa do solo, que diminui a sua plasticidade, podendo ser ou não acompanhada de aumento da resistência mecânica, uma vez que o cimento, nestes casos, forma núcleos independentes na massa de solo (ver figura 3.6b).

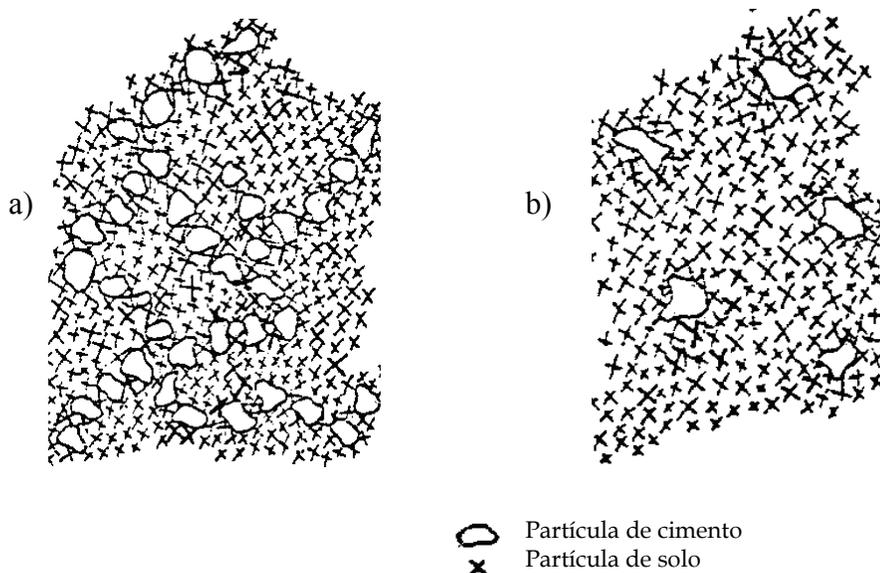
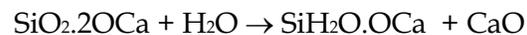
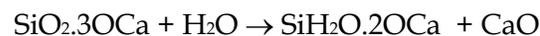


Figura 3.6: Solo com cimento: a) alto teor; b) baixo teor (Cruz & Jalali, 2009)

Sendo os cimentos do tipo Portland os mais utilizados para a estabilização de solos, e tendo estes na sua composição cerca de 45% de silicato tricálcico ( $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{OCa}$ ) e 27% de silicato bicálcico ( $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{OCa}$ ), a sua hidratação com o solo dá origem a um gel de silicato hidratado de bi e monocálcio ( $\text{SiH}_2\text{O} \cdot 2\text{OCa}$  e  $\text{SiH}_2\text{O} \cdot \text{OCa}$ ), de acordo com as equações:



Durante estas reacções de hidratação é libertada alguma cal que provocará uma aglutinação das partículas argilosas, no entanto, pouco significativa sobretudo se comparada com a proporção de partículas granulares que passarão a estar interligadas.

Durante estas reacções de hidratação é libertada alguma cal que provocará uma aglutinação das partículas argilosas, no entanto, pouco significativa sobretudo se comparada com a proporção de partículas granulares que passarão a estar interligadas. Esta hidratação dos constituintes do cimento prolongar-se-á no tempo, conduzindo aos aumentos de resistência, devido à criação de produtos ligantes amorfos, e à consolidação do endurecimento a longo prazo, devido aos produtos cristalinos. Por sua vez, a cal libertada durante as reacções de hidratação do cimento vai provocar o endurecimento dos agregados de partículas de argila (Cristelo, 2001).

A granulometria e a plasticidade conduzem a mecanismos de estabilização distintos (acção aglutinante ou modificadora) que podem ser simultâneos ou não, consoante o teor em cimento.

Nas misturas de solos granulares com cimento a quantidade de aditivo não é suficiente para preencher a totalidade dos vazios existentes. Assim, no caso destes solos o cimento ligará as áreas de contacto das partículas de solo. Como estas áreas dependem da granulometria do solo, maximizando-se o número de pontos de contacto, o que aumenta com a boa graduação dos solos, menor será o teor em cimento necessário para se atingir certa resistência.

Nos solos coesivos, durante as reacções iniciais de hidratação do cimento dá-se a libertação de iões cálcio, o que pode provocar a permuta com os iões existentes nas partículas de argila, alterando assim a distribuição das cargas eléctricas, o que conduz a uma atracção mútua das partículas e à sua floculação. As partículas de argila adquirem maiores dimensões e perdem plasticidade e coesão. De salientar que os processos envolvidos na

estabilização de solos com cimento são fortemente prejudicados pela presença de matéria orgânica no solo, que inibe ou retarda a acção aglutinante do cimento e dificulta a libertação de iões cálcio.

Relativamente à quantidade de água nas misturas de solo-cimento esta corresponde ao teor em água óptimo para a compactação, obtido através do ensaio Proctor na mistura de solo e cimento. O teor em água necessário para a hidratação do cimento é inferior ao óptimo para a compactação, pelo que a água necessária para a hidratação está assegurada se forem satisfeitas as necessidades de compactação e se não houver perdas durante o período de cura. Esta água permite obter a máxima densidade através da lubrificação dos grãos de solo e permite a hidratação do cimento que endurece o solo numa massa sólida. Sendo assim, o teor em água da mistura de solo-cimento, desde o fim da mistura húmida até ao fim do acabamento, deve estar compreendido entre 0.95 e 1.10 vezes o teor em água óptimo (Pereira, 1970).

O grupo de estudos CRAterre recomenda percentagens de cimento entre 6 a 10% na estabilização de solos para a construção em terra.

O estabilizante correntemente utilizado no fabrico de BTC, é o cimento embora a cal se assuma como um estabilizante mais barato e mais sustentável, porquanto não tem um impacto ambiental tão elevado, pelo que é expectável que a sua utilização venha no futuro a ganhar uma utilização superior.

# 4

## Propriedades

**Resistência Mecânica**

**Módulo de elasticidade**

**Resistência aos Sismos**

**Desempenho Termo-Higrométrico**

**Isolamento Acústico**

## Resistência Mecânica

Motta (1997) analisou a influência da estabilização de solos da zona do Baixo Alentejo na resistência à compressão, comparando a estabilização mecânica com a estabilização por adição de 7% de cal aérea hidratada e de 7% de cimento (Tabela 4.1).

**Tabela 4.1:** Resistência mecânica aos 21 dias para diferentes processos de estabilização (Motta, 1997)

	Tensão de rotura (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Tensão de rotura (MPa)
	Solo com compactação mecânica para o teor de água ótimo	Solo+7% de cal aérea	Solo+7% de cimento
Albergaria 1	1,04	1,08	2,90
Albergaria 2	1,89	1,38	4,50
S. Susana	1,70	1,26	2,60
Pulo do Lobo	0,57	1,36	1,50
S. Luis	1,60	1,74	3,20
S. Clara	0,75	1,44	1,11
Porto Covo	1,08	1,14	1,20
Barragem Roxo	1,42	1,92	4,95
Messejana	0,97	1,54	1,50

**Nota:** As características destes solos estão nas Tabelas 3.7 e 3.8

Os resultados obtidos revelam que a adição de cal, só conduz a melhorias da resistência para solos com elevada fracção argilosa (S.Clara) e elevada quantidade de siltes conjugada com uma certa quantidade de argilas (Pulo do Lobo), já nos casos dos solos em que predomina a fracção arenosa, a adição de cal pode levar inclusive à redução da resistência à compressão comparativamente à estabilização mecânica. Já a adição do cimento conduz sempre a um aumento de resistência, sendo no entanto esse aumento mais expressivo para solos com maior fracção arenosa.

Já Eusébio (2001) estudou a estabilização de solos da região de Aljezur para serem utilizados na construção em taipa, tendo observado que a utilização de elevadas percentagens de cal conduzem a baixas resistências à compressão e que a utilização de uma percentagem de 7% de cimento permite obter resistências à compressão superiores a 2MPa, logo a partir dos 7 dias de cura (Figura 4.1).

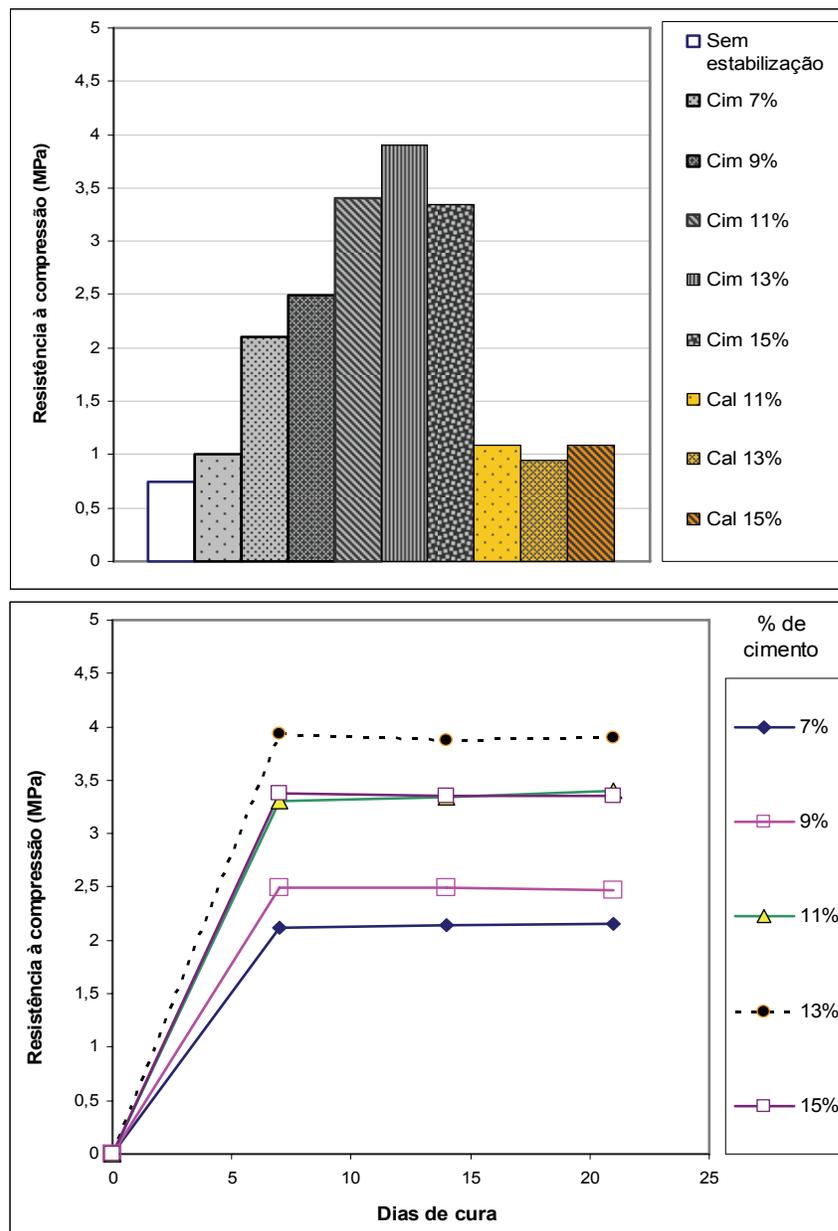


Figura 4.1: Influência da estabilização na resistência mecânica (Adaptado de Eusébio, 2001)

Houben & Guillaund (1989) referem que o CRAterre recomenda uma resistência à compressão de 2MPa para a construção de edifícios em terra com um piso.

Segundo Schroeder *et al.* (2008), as especificações alemãs, “*Lehmbau Regeln*”, exigem que os blocos de paredes de terra com capacidade resistente, possuam uma resistência individual de 2MPa, devendo o valor médio do ensaio de 6 amostras não ser inferior a 2,5MPa.

Maniatidis & Walker (2003) citam valores da resistência à compressão mínimos (Tabela 4:2)

**Tabela 4.2:** Resistência à compressão não confinada (Manatidis & Walker, 2003)

Referência	Resistência à compressão não confinada (MPa)
(Middleton, 1992)	0,7
(Standards, 2002)	0,4-0,6
(NZS 4298, 1998)	0,5
(Tibbets, 2001)	2,07

Se a mistura de terra for homogênea a construção apresenta fortes propriedades estruturais. A resistência à compressão é de aproximadamente 0.5 MPa para adobe e de 18 MPa para BTC. Os resultados médios de resistência à flexão correspondem a aproximadamente 30% dos resultados de compressão (Correia *et al.*, 2005). Estes autores referem que o aumento das dimensões dos blocos de adobe influencia de forma significativa a resistência à compressão e à flexão. Tendo os resultados mais elevados, sido obtidos para as dimensões (23x11x5,5 cm<sup>3</sup>).

Lourenço (2002) apresenta uma análise comparativa entre a diferença da resistência à compressão para as diferentes variantes da construção em terra (Tabela 4.3).

**Tabela 4.3:** Resistência mecânica das variantes da construção em terra (Lourenço, 2002)

	BTC			Adobe		Taipa	
	a	b	c	d	e	f	g
Rc 28 dias seca (MPa)	>2	2-5	>12	>2	2-5	<2	2-5
Rc 28 dias húmida (24 h em água)	0-0,5	0,2	0,2	0-0,5		0-0,5	2

a-Compressão a 2MPa

b-Estabilização com 8% de cimento e compressão a 4 MPa

c-Estabilização com 12 a 19% de cal e compressão a 30 MPa

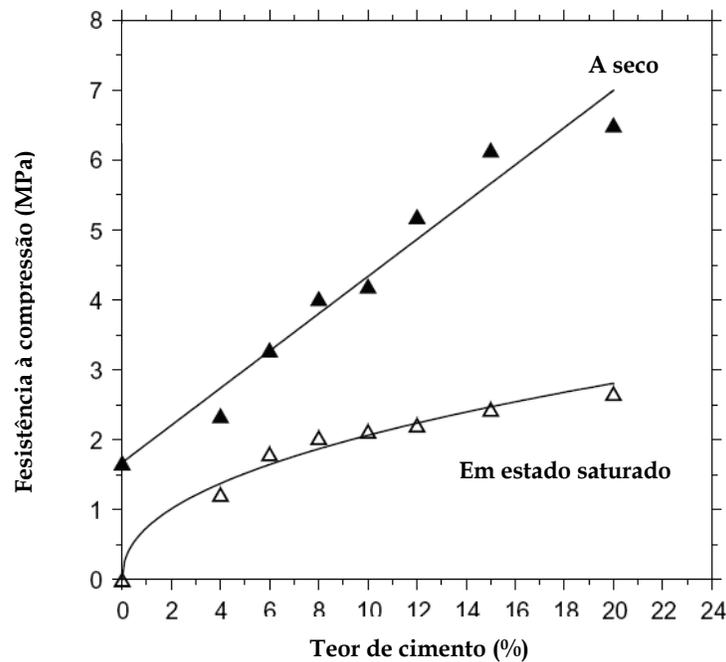
d-Blocos cortados directamente do solo

e-Estabilização com 5 a 9% de emulsão de betume

f-Compressão a 90-95%. Proctor Standard.

g-Estabilização com 8% de cimento e Compressão a 90-95%. Proctor Standard.

Bahar *et al.* (2004) compararam o desempenho de provetes de terra estabilizados com diferentes teores de cimento, ensaiados a seco e depois de imersos em água durante 48 horas, tendo observado uma perda de resistência bastante elevada, qua não é compensada com o aumento do teor de cimento (Figura 4.1).

**Figura 4.2:** Resistência à compressão: Estado seco versus estado saturado (Bahar *et al.*, 2004)

Achenza & Fenu (2006) observaram aumentos da resistência em blocos de adobe estabilizados com polímeros naturais. Estes autores ensaiaram provetes cúbicos de 10cm de aresta obtendo valores de 4 MPa na resistência à compressão. Estes autores referem que a imersão dos provetes em água não afecta de forma expressiva a sua resistência.

Morel *et al.* (2007) analisam as diversas variantes de ensaio na determinação da resistência à compressão, observando que embora alguns países utilizem um procedimento similar ao utilizado no ensaio de blocos de alvenaria, na verdade diversos autores utilizam provetes de terra com dimensões muito diferentes entre si, com diferentes teores de ligante, com diferentes tipos de capeamento ou por exemplo com diferentes teores de humidade. Estes autores referem que o RILEM sugere a utilização de duas metades de blocos de terra capeados com neoprene, ligados entre si por uma junta de argamassa (Figura 4.3), como um ensaio que é pouco influenciado pela geometria dos blocos.



*Figura 4.3: Resistência à compressão- Procedimento do RILEM (Morel et al., 2007)*

Millogo *et al.* (2008) estudaram a influência da adição de cal em solos argilosos para fabrico de blocos de adobe, concluindo que a utilização de 10% de cal maximiza a resistência à compressão.

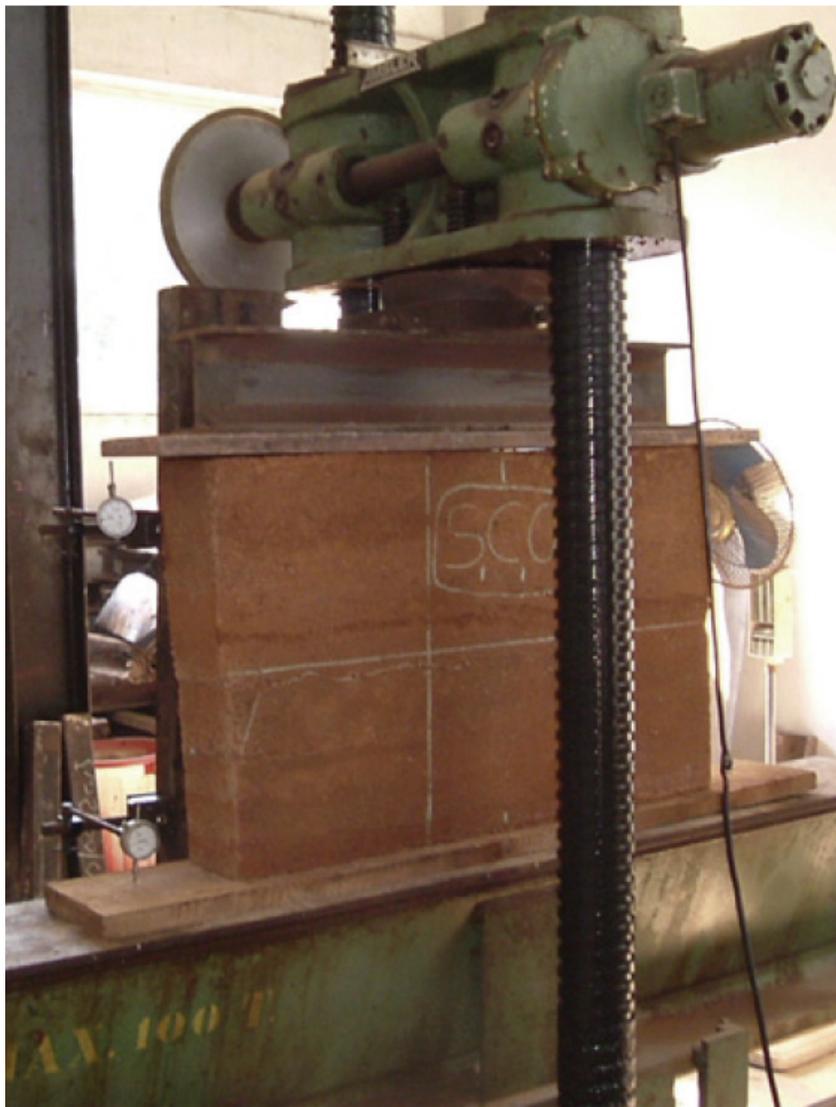
Yetgin *et al.* (2008) estudaram o efeito da adição de fibras de palha de trigo com 5 cm de comprimento, em blocos de adobe, realizados com solo do Norte da Europa (Alemanha). Tendo observado que o aumento do teor de fibras conduz a uma diminuição da retracção mas também da resistência à compressão e à flexão. Estes autores recomendam que a percentagem de fibras utilizadas não exceda 0,5% do peso da mistura.

Jayasinghe& Kamaladasa (2007) analisaram a resistência à compressão de paredes de taipa (Figura 4.4) estabilizada com diversos teores de cimento (6,8 e 10%), observando que a ação estabilizante do cimento é mais eficaz para os solos arenosos, mas obtendo ainda assim elevados valores de resistência para solos argilosos (Tabela 4.4):

**Tabela 4.4:** Resistência à compressão de troço de parede de taip (Jayasinghe& Kamaladasa, 2007)

Solo	Teor de cimento (%)	Resistência média (MPa)
Arenoso	6	2,47
	8	3,5
	10	3,7
Laterítico rijo	6	2,0
	8	1,9
	10	2,8
Argiloso	6	1,8
	8	2,1
	10	2,3

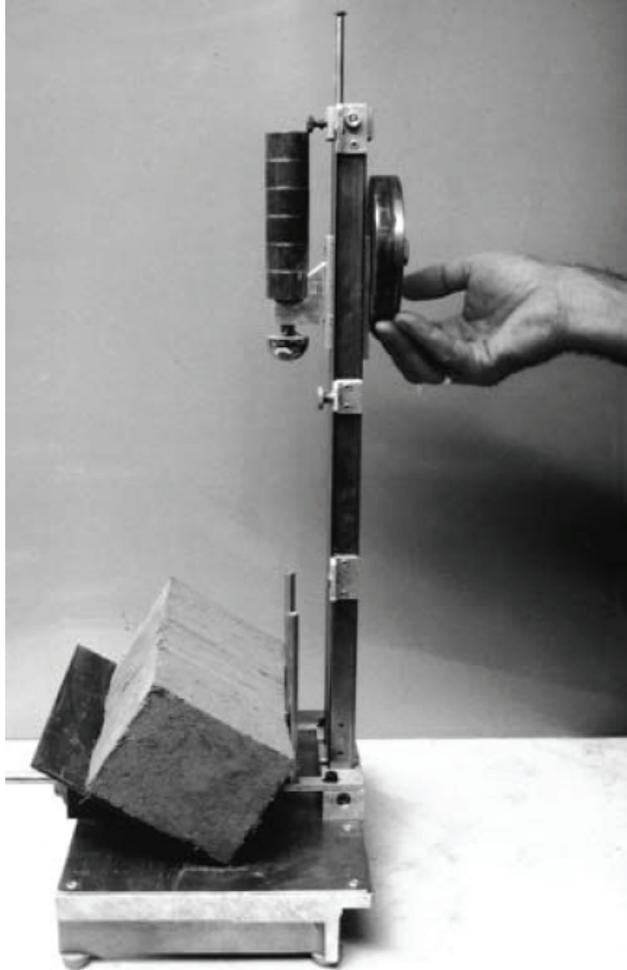
Estes autores referem que o mecanismo de ruptura das paredes de taipa é bastante frágil e se faz sem aviso prévio, devido à falta de juntas rígidas em argamassa como as que existem nas alvenarias de tijolo cozido, pelo que será necessário a adopção de coeficientes de segurança mais elevados.



*Figura 4.4: Avaliação da resistência à compressão de um troço de taipa (Jayasinghe& Kamaladasa, 2007)*

Para Minke (2006), um dos pontos fracos dos blocos de terra em termos da sua utilização em obra, prende-se com a quebra frequente das suas arestas devido a impactos de origem acidental, pelo que na sua opinião tão ou mais importante que assegurar que os blocos de terra possuem uma determinada resistência à compressão ou à flexão, é necessário assegurar que os mesmos conseguem resistir aos impactos que ocorrem durante a fase de aplicação.

Para esse efeito sugere um ensaio para avaliação da resistência ao impacto que consiste na queda de uma massa metálica sobre a aresta de um bloco de terra inclinado a  $60^\circ$  (Figura 4.5).



*Figura 4.5: Avaliação da resistência ao impacto (Minke, 2006)*

## Módulo de Elasticidade

Eusébio (2001) analisou o comportamento mecânico de solos da região de Aljezur estabilizados com cimento, observando que o aumento do teor de cimento aumenta o módulo de elasticidade e que existe uma elevada correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão (Figura 4.6).

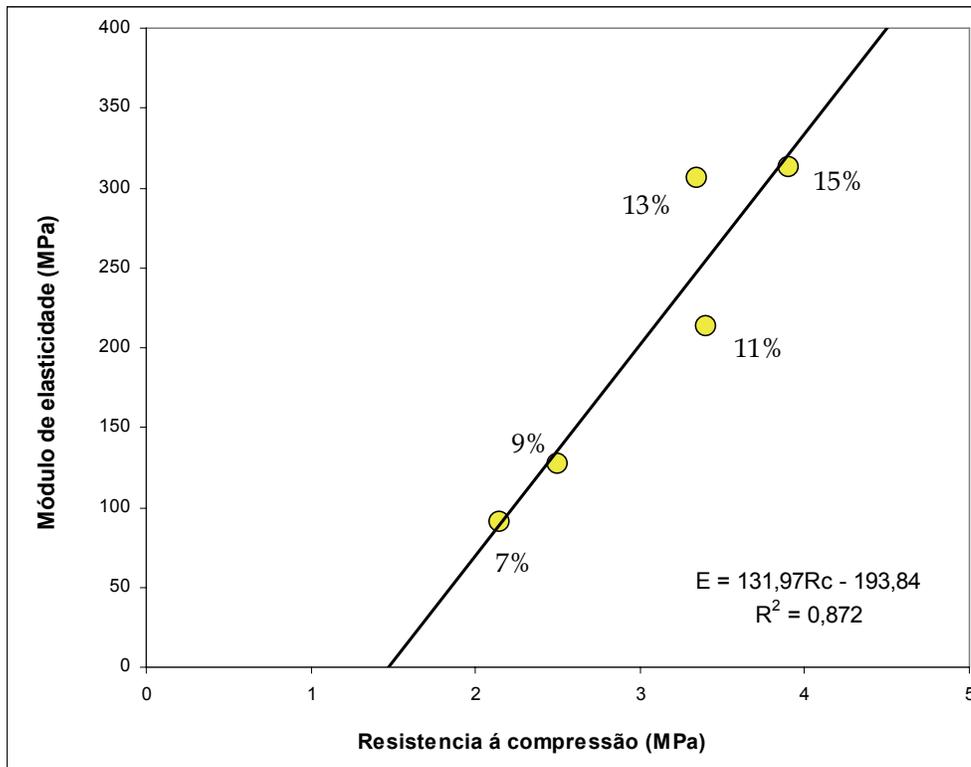


Figura 4.6: Influência da resistência à compressão no módulo de elasticidade de solo estabilizado com diferentes teores de cimento (Adaptado de Eusébio, 2001)

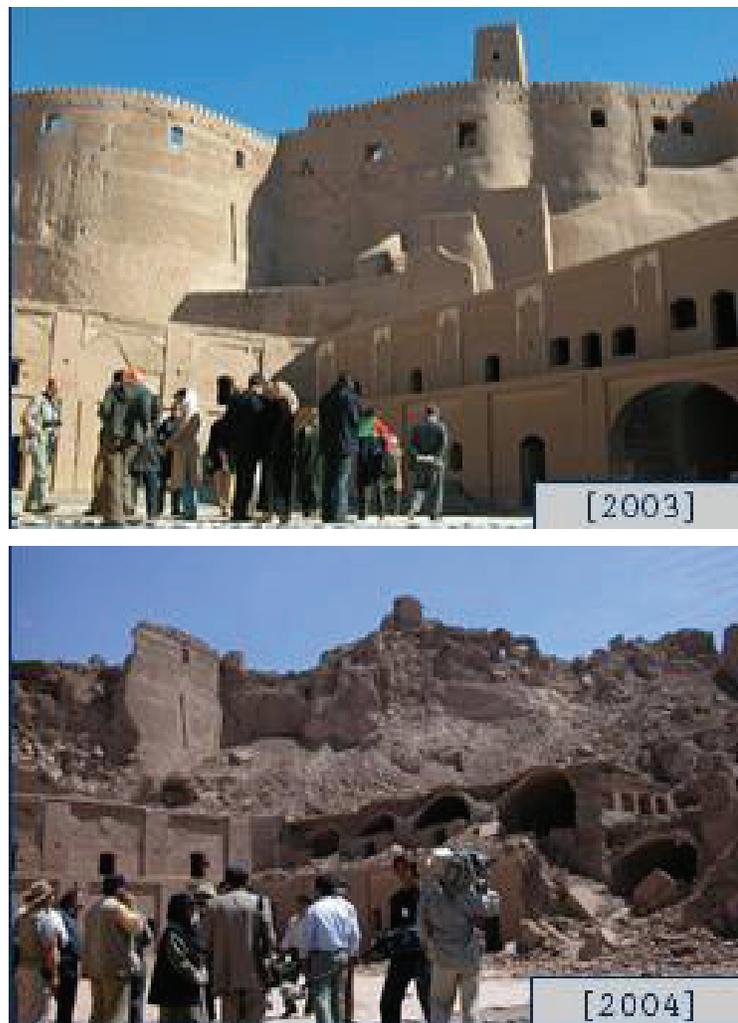
Bahar *et al.* (2004) obteve valores de módulo de elasticidade a variar entre 1,89 e 2,51 GPa respectivamente para solo sem cimento e solo estabilizado com 10% de cimento, valores que no entanto suscitam algumas reservas por serem bastante elevados.

Jayasinghe& Kamaladasa (2007) referem módulos de elasticidade em torno dos 500MPa. Que são próximos dos recomendado pelo Manual Australiano da construção em terra (Standards, 2002). E também similar aos recomendados por outros documentos no valor de  $300 \times f_c$  (NZS, 1998).

Na simulação do comportamento à acção sísmica de uma habitação em terra, Gomes (2008) tomou para valor do módulo de elasticidade da terra a utilizar nas paredes da habitação o valor de 200 MPa.

## Resistência aos Sismos

Um dos mais evidentes óbices mecânicos da construção em terra, tem que ver com a sua baixa capacidade de resistir às acções horizontais características dos sismos. É bem conhecido o caso da cidadela de Arg-é Bam (Figura 4.7), considerada Património mundial da Unesco e localizada em Bam (Irão), onde existia o maior número de construções em adobe do mundo que remontam até 500 A.C, as quais foram destruídas na sua grande maioria por um sismo ocorrido em 2003, o qual originou mais de 20.000 vítimas humanas.



*Figura 4.7: Cidadela de Arg-é-Bam, Irão: Antes e após sismo de 2003*

Se fizermos uma análise cruzada das zonas de risco sísmico a nível mundial (Figura 4.8), com as zonas com forte incidência da construção em terra (Figura 4.9), facilmente se conclui que muito embora haja muita construção em terra em zonas sem risco sísmico, o inverso também ocorre, pelo que este é um aspecto que deve merecer especial atenção.



*Figura 4.8: Zonas de risco sísmico elevado e muito elevado*

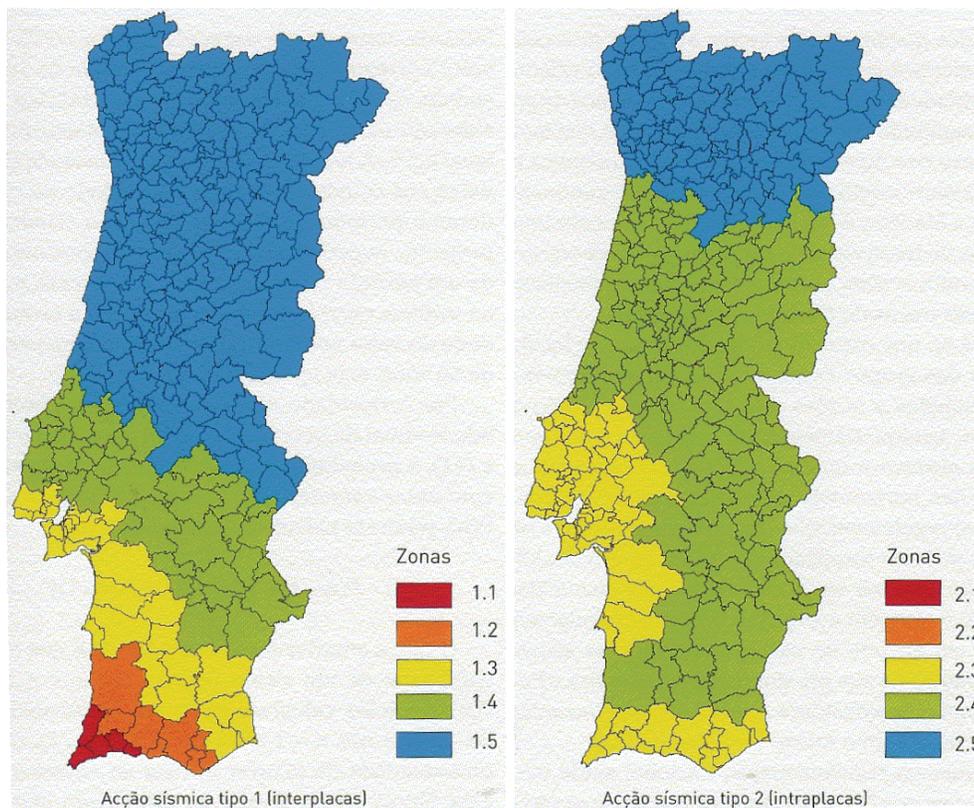


*Figura 4.9: Zonas com elevada densidade de construção em terra*

Em Portugal e até há bem pouco tempo o risco sísmico encontrava-se previsto no Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes – RSAEEP, o qual definia coeficientes de sismicidade variáveis em função da probabilidade de ocorrência de um sismo. Os coeficientes referidos assentavam num estudo de sismologia da década de 70 baseado em modelos probabilistas (Oliveira, 1977).

Para colmatar incertezas dos modelos probabilistas, têm sido desenvolvidos em Portugal modelos estocásticos de simulação de sismos, para que seja possível reproduzir artificialmente os sismos de maiores magnitudes para os quais não existem registos instrumentais, com a consideração dos efeitos geológicos locais (Estêvão & Oliveira, 2008).

A adaptação das acções sísmicas nacionais ao Eurocódigo 8 (CEN, 2004), levou a um novo zonamento do território nacional (Figura 4.10)



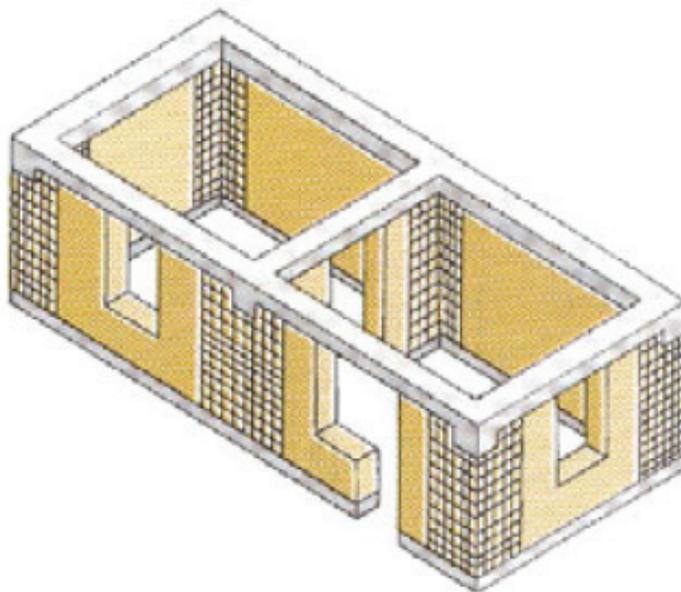
**Figura 4.10:** Zonamento sísmico proposto no EC8 (Azevedo, 2008)

Como se pode ver a maior parte das zonas do Sul de Portugal, que são as que estão mais vocacionadas para a construção em terra, estão localizadas nas zonas de maior risco sísmico, pelo que o reforço da construção em terra para aumento da sua resistência sísmica é assim um tema incontornável.

Segundo Isik (1999), os blocos de adobe apresentam uma boa resistência e ductilidade à acção sísmica. Embora uma tal constatação, não permita inferir de um razoável desempenho da construção com adobe em termos antisísmicos.

Para Lourenço (2005) as paredes devem possuir uma espessura mínima de 0,4m e uma altura inferior a sete vezes a sua espessura (com um máximo de 3,5m) e um comprimento livre inferior a 10 vezes a espessura da parede (com um máximo de 5m). Este autor refere ainda que as aberturas deverão possuir uma largura máxima de 1,2m, com um máximo de um terço do comprimento da parede.

Bartolomé *et al.* (2006) recomendam a adopção de algumas medidas no sentido do aumento da resistência anti-sísmica das construções em adobe, como seja a utilização de um lintel de fundação e de uma viga de bordadura, corridos ao longo do perímetro das paredes e a utilização de um pequeno dente para fazer a ligação entre as paredes e a viga de bordadura (Figura 4.11)



**Figura 4.11:** Construção em adobe com reforço anti-sísmico (Bartolomé *et al.*, 2006)

Parreira (2007) analisou o comportamento sísmico de uma construção em taipa, tendo constatado que a presença de vigas de bordura no topo da paredes é um factor fundamental na resistência sísmica, porquanto permite uma compatibilização dos deslocamentos entre as várias paredes permitindo o seu funcionamento em conjunto. Este autor refere que para este efeito deve ser assegurada uma boa ligação entre as vigas e a taipa, sugerindo a utilização de chumbadouros cujo espaçamento deve ser suficiente para resistir aos esforços de corte desta zona (Figura 4.12)

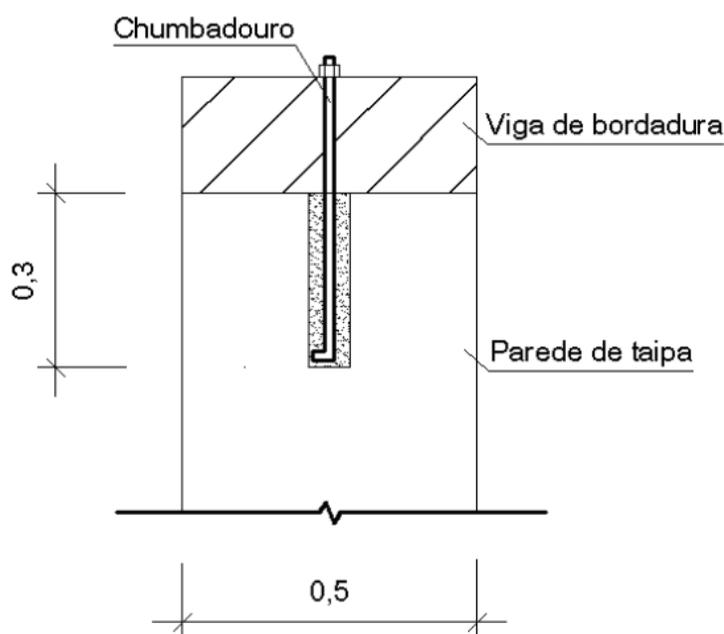


Figura 4.12: Reforço da ligação viga/parede através de chumbadouros (Parreira, 2007)

Gomes (2008) estudou a influência de várias soluções de reforço estrutural na resistência à acção sísmica de construções em taipa, tendo concluído ser possível a construção de edifícios com este material, de forma a verificar a segurança sísmica em termos do RSAEEP, (actual regulamento sísmico que divide o território nacional em 4 zonas de A a D, sendo A a mais gravosa e D a menos gravosa). Esta autora analisou 5 edifícios de taipa, sendo que para cada um deles se associou uma medida de reforço diferente:

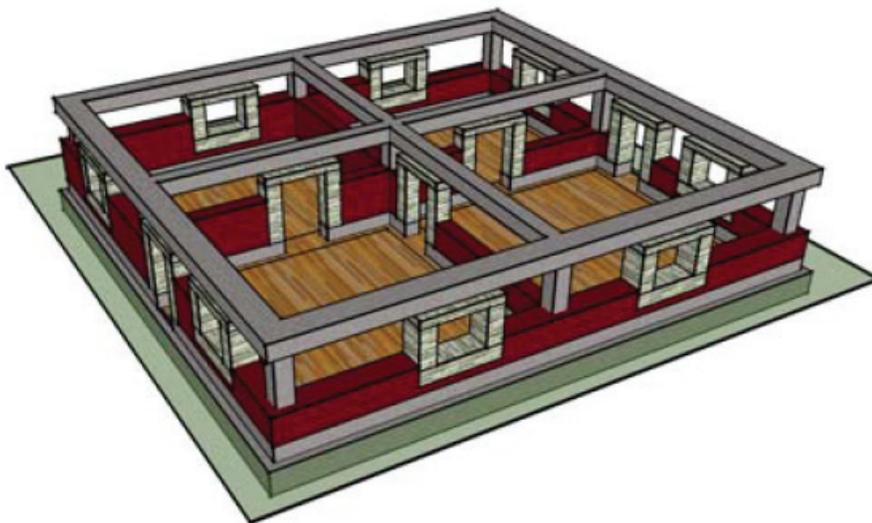
1º - Moradia de R/C e alvenaria de taipa com vergas de madeira em portas e janelas.

2º - Moradia idêntica à anterior, diferindo da primeira por ter cunhais em pedra assim como vergas, peitoris e ombreiras.

3º - Moradia idêntica à anterior, reforçada com tirantes de Ø16 em aço A400.

4º - Moradia idêntica à anterior, em que os tirantes de aço são substituídos por uma viga de bordadura em betão armado e secção  $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ .

5º - Moradia idêntica à anterior com pilares de  $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$  em betão armado (Figura 4.13).



*Figura 4.13: Modelo estrutural correspondente à medida de reforço 5 (Gomes et al., 2008)*

Os resultados da simulação sísmica em termos de tensões de tracção apontam para o facto da moradia com ombreiras de madeira em vãos, só ser indicada para a zona sísmica D (Zona Norte de Portugal). Já as moradias com os reforços 3º e 4º, só são admisíveis para a zona sísmica C (Zona situada a Norte de Soure). Sendo que para a zona sísmica A, zona que é mais indicada para a construção em terra, a utilização dos reforços em betão

armado (5º reforço) complementada com a utilização de terra aditivada com cimento na execução das alvenarias de taipa, consegue satisfazer os Estados Limites últimos.



*Figura 4.14: Construção corrente em taipa reforçada com tirantes de aço, correspondente à medida de reforço 3 (Gomes, 2008)*

## Desempenho Termo-Higrométrico

### Higroscopicidade

A propriedade relacionada com a capacidade dos materiais para absorverem e restituírem humidade ao ambiente onde estão colocados é designada por

higroscopicidade e é função da porosidade superficial dos materiais. Um material diz-se higroscópico, se o seu teor de humidade variar em função da humidade relativa do ambiente. Vários autores referem que nos blocos de adobe, se observa uma relação directa entre absorção e porosidade, sendo que o tamanho dos poros e a sua distribuição determina o grau de absorção de água (Médout *et al.*, 1998; Kerali, 2000; Xian-Qing, 2003)

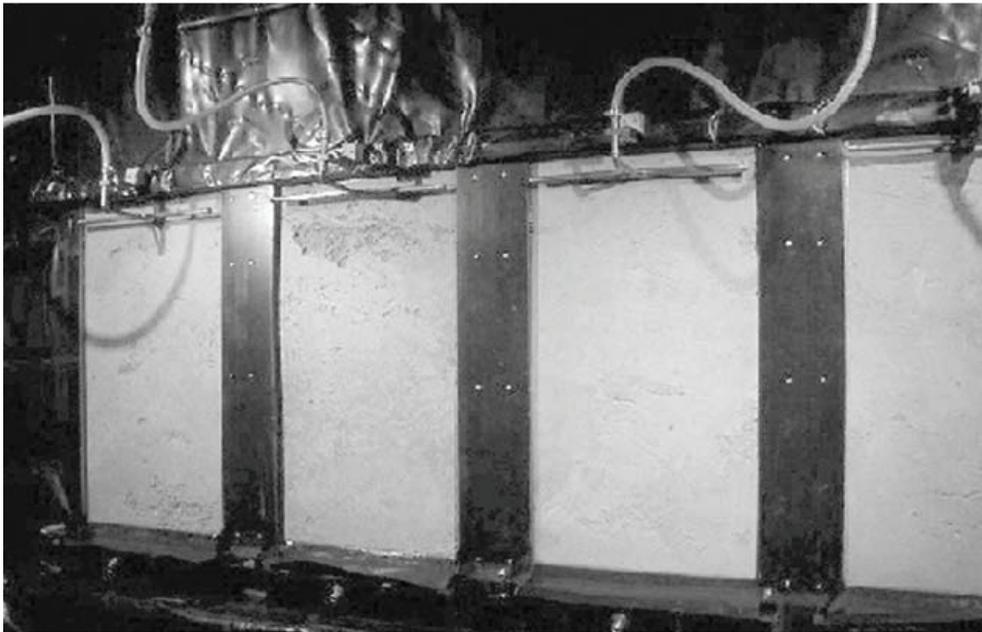
Hall & Djerbib (2004) estudaram a influência da granulometria do solo utilizado na construção em taipa em termos do seu comportamento higroscópico, observando que embora este sistema construtivo apresente um melhor desempenho do que as alvenarias tradicionais à base de blocos cerâmicos ou de betão, apresentando uma bastante menor absorção de água por capilaridade, este desempenho é no entanto muito dependente da granulometria do solo. Os mesmos autores referem que existe um teor óptimo de cimento, o qual minimiza a absorção de água de paredes de taipa, já que ao densificar a mistura o cimento vai aumentar a quantidade de microporos, sendo que este teor varia em função da granulometria do solo utilizado (Hall & Djerbib, 2006).

Hall & Djerbib (2006a) referem a utilização de um parâmetro obtido pelo quociente entre a superfície específica total e o teor de argila ( $SSA_t/CC$ ), sendo que os solos com um rácio=3,35 são aqueles que apresentam um melhor desempenho em termos higrométricos, ou seja tem uma absorção de água por capilaridade mínima e uma elevada taxa de secagem dessa mesma água.

Achenza & Fenu (2006) observaram que a utilização de polímeros naturais reduz a porosidade de blocos de adobe.

Millogo *et al.* (2008) estudaram a influência da adição de cal a solos argilosos para fabrico de blocos de adobe, concluindo que a utilização de 10% de cal minimiza a absorção de água dos blocos de adobe.

Hall (2007) refere o desenvolvimento de uma câmara de simulação climática (Figura 4.15), que permite analisar o comportamento simultâneo de vários troços de paredes, em termos do ingresso de humidade e da ocorrência de condensações internas. Enquanto que a face exterior da parede fica sujeita a condições de humedecimento típicas da ocorrência da precipitação com ou sem vento, a outra face da parede encontra-se dentro de um comportamento fechado onde se simulam as condições higrométricas típicas de um edifício de habitação.



*Figura 4.15: Análise do comportamento à humidade de 4 paredes de taipa (Hall, 2007)*

Durante o ensaio de 4 paredes de taipa não revestidas e estabilizadas com 6% de cimento, Hall (2007) pode constatar que após 5 dias consecutivos de humedecimento com condições de pressão que simulavam a ocorrência de vento forte, não houve ingresso de humidade no interior das paredes de taipa. O mesmo autor revela, que este desempenho compara muito favoravelmente com o de paredes de granito com 30 cm de espessura, assentes e revestidas com argamassas à base de cal, as quais apresentaram ingresso de humidade na face oposta à face humedecida.

## Comportamento Térmico

Em termos de comportamento térmico, os materiais são tanto mais eficazes quanto menor for o seu coeficiente condutibilidade térmica, pois nesse caso será maior a resistência térmica desse material (R) e menor o coeficiente de transmissão térmico (U), do elemento construtivo do qual faz parte o revestimento, gerando menos perdas de energia para o exterior da habitação.

Maniatidis & Walker (2003) referem inquéritos levados a cabo a residentes de habitações construídas com taipa à base de calcite, na região de Amesbury-Inglaterra, os quais são unânimes em salientar que o ambiente interior das habitações é bastante agradável, sendo quente no Inverno e fresco no Verão.

Lourenço (2002) refere valores de condutibilidade térmica para a construção em terra que comparam favoravelmente com soluções construtivas tradicionais (Tabela 4.5).

**Tabela 4.5:** Condutibilidade térmica para as variantes da construção em terra (Lourenço, 2002)

W/(m. °C)	BTC			Adobe		Taipa	
	a	b	c	d	e	f	g
	0,81-0,93		0,93-1,04	0,46-0,81		0,81-0,93	

a-Compressão a 2MPa

b-Estabilização com 8% de cimento e compressão a 4 MPa

c-Estabilização com 12 a 19% de cal e compressão a 30 MPa

d-Blocos cortados directamente do solo

e-Estabilização com 5 a 9% de emulsão de betume

f-Compressão a 90-95%. Proctor Standard.

g-Estabilização com 8% de cimento e Compressão a 90-95%. Proctor Standard.

Já Quintino (2005) refere valores do coef. de transmissão térmico, de 0,208 W/m<sup>2</sup> °C, em paredes de 0,30 de espessura fabricadas em blocos de BTC.

Goodhew & Griffiths (2005) refere que as paredes tradicionais à base terra utilizadas na região da Grã-Bretanha, conhecidas como “cob walls”, apresentam para uma espessura de 60 cm, valores do coeficiente de transmissão térmico (U), que são aproximadamente o dobro do valor admissível em termos regulamentares naquele país e que é de  $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Este autor sugere diversos tipos de paredes à base de terra, que respeitam o valor definido em termos regulamentares e adiantam ainda que é possível aumentar o desempenho térmico das paredes de terra das habitações tradicionais por a cumprirem o valor mínimo regulamentar utilizando um isolamento térmico no interior da habitação.

Parra-Saldibar & Batty (2006) analisaram o comportamento térmico de construções em adobe, observando que o seu desempenho está dependente do seu teor de água e que conseqüentemente as construções executadas com este material, são muito influenciadas pelos ciclos de molhagem e de secagem.

Uma das mais interessantes características das paredes de terra tem que ver não com o seu nível de isolamento térmico, mas sim com a sua elevada inércia térmica, ou seja, com a sua capacidade para armazenar e gerir o calor que recebe seja de fontes solares ou outras com resposta diferida temporalmente. A questão da inércia térmica das paredes de terra é contudo um tema que merece ainda ser objecto de aprofundadas investigações.

## Isolamento Acústico

O isolamento acústico associado à construção em terra é bastante elevado, comparando favoravelmente com as soluções construtivas tradicionais (Tabela 4.6).

**Tabela 4.6:** Índice de redução sonora (Lourenço, 2002)

Índice de redução sonora $I_a$ (dB)	BTC			Taipa	
	a	b	c	d	e
Parede de 0,4m a 500Hz	60			60	
Parede de 0,2m a 500Hz	50			50	

a-Compressão a 20 Bar

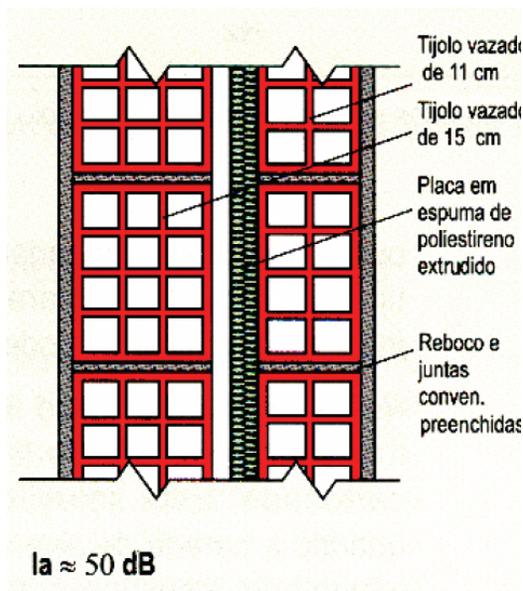
b-Estabilização com 8% de cimento e compressão a 40 Bar

c-Estabilização com 12 a 19% de cal e compressão a 300 Bar

d-Compressão a 90-95%. Proctor Standard.

e-Estabilização com 8% de cimento e Compressão a 90-95%. Proctor Standard.

Note-se que uma parede dupla de tijolo cerâmico (11+15), com isolante na caixa-de-ar apresenta um índice de redução sonora de aproximadamente 50 dB (Figura 4.16).



**Figura 4.16:** Índice de isolamento aos sons aéreos (Dias, 2002)

Delgado & Guerrero (2006) refere um índice de redução sonora de 58dB para uma frequência de 500hz, em paredes de terra com 50 cm de espessura.

Morton (2008) menciona índices de redução sonora a variar entre 46 e 57, para paredes de blocos de terra com espessuras entre 13 e 36,5 cm., valores bastante elevados quando comparados com uma parede tradicional de tijolo de 7 rebocada nas duas faces com espessura final de 11cm que tem um índice de redução sonora de 35 dB.

Dobson (2000) refere que as alvenarias de terra possuem um baixo índice de reflexão de ondas sonoras, ao contrário das superfícies mais rígidas como as alvenarias de tijolo cerâmico que produzem um desagrável efeito de eco. Este autor refere que uma parede de taipa com 0,30m de espessura apresenta um elevado índice de redução sonora de 57 dB.



# 5

## Durabilidade

**Considerações Prévias**

**Ensaio de Avaliação da Durabilidade**

## Considerações Prévias

A palavra durabilidade provém do latim *durabilis*, que significa aquilo que é durável ou seja que perdura através do tempo. Contudo um material de construção, só pode considerar-se como sendo durável, quando consegue manter ao longo do tempo (vida útil), a sua capacidade de resistência à acção de forças e a sua integridade estrutural mesmo após ser sujeito a fenómenos de degradação mecânicos, físicos e químico quando colocado em serviço, quer por acção ambiental ou decorrente da actividade humana.

Aquilo que se conhece em termos da durabilidade das construções em terra, resulta da constatação de que algumas construções em terra conseguiram perdurar durante dezenas e até centenas de anos (Figura 5.1), também do comportamento daquelas construções em ensaios de envelhecimento acelerado e mais recentemente da monitorização de troços experimentais de alvenarias de terra construídas para o efeito há algumas dezenas de anos atrás.



*Figura 5.1: Casa com parede de taipa com 150 anos no Sul de França (Bui et al., 2008)*

Segundo Heathcote (1995), o principal mecanismo responsável pela erosão das paredes de terra, tem que ver com a energia cinética do impacto das chuvas nas paredes feitas com aquele material. Facto que justifica, o pior comportamento de paredes de terra orientadas a Sul, direcção associada a chuvas com uma componente horizontal devida ao vento. Este autor sugere que a aferição da durabilidade de blocos de adobe, seja feita com recurso ao rácio resistência mecânica húmida/resistência mecânica em seco. Já Ogunye & Boussabaine (2002) referem que a chuva nem sempre tem um efeito erosivo nas paredes de terra, o que só sucede para intensidades a partir de 25mm/m.

Parte da elevada durabilidade das construções em terra, está associada à utilização de solos estabilizados com cimento ou cal e ou utilização de revestimentos que impeçam ou minimizem as patologias associadas à acção da água (Ngowi, 1997). Também Isik (1999), refere que a forma mais eficaz para se conseguir um aumento da durabilidade dos adobes, passa pela sua compactação e a sua estabilização com aditivos. Soares *et al.* (2004) referem o caso de uma habitação em zona de elevada pluviosidade com paredes monolíticas em solo-cimento compactado, cuja vistoria após 1 ano revela não haver fissuração de paredes nem presença de humidades (Figura 5.2).



*Figura 5.2: Casa com paredes de solo-cimento compactado após 1 ano de uso (Soares et al., 2004)*

Bahar *et al.* (2004) estudaram adobes executados com areias argilosas do Leste da Argélia, revelando que um aumento da adição do teor de cimento de 5% para 20%, conduz a uma redução na permeabilidade à água de  $14 \times 10^{-8}$  m/s, para  $0,27 \times 10^{-8}$  m/s, o que comprova a influência da estabilização na durabilidade deste material. Estes autores referem que os ensaios de envelhecimento acelerado conduziram à ruína total dos adobes executados com solo não estabilizado.

Achenza & Fenu (2006) observaram que a utilização de polímeros naturais contribui para o aumento da durabilidade da construção em adobe, pelo facto da sua adição aumentar a resistência à acção da água. Estes autores afirmam que blocos de adobe estabilizados com polímeros naturais, mantém a sua integridade após 8 dias de imersão em água, sendo que os blocos não estabilizados se desintegram imediatamente após a imersão. Também observaram que blocos estabilizados com  $40 \times 20 \times 10 \text{cm}^3$ , expostos durante 2 anos a um regime de chuva mediterrânico, não evidenciaram sinais de erosão.

Guettala *et al.* (2006) estudaram o desempenho de paredes de adobe com solo à base de caulinos e ilites, aditivado com diferentes estabilizadores (cimento, cal, cimento+cal, cimento + resinas). As paredes foram sujeitas a condições climáticas naturais no território Argelino e compararam-no com o comportamento do mesmo material, quando sujeito a ensaios para avaliação da durabilidade em contexto laboratorial. Estes autores referem que as paredes feitas com adobes aditivados, sujeitam a condições climáticas naturais, não apresentaram qualquer sinal de deterioração após 4 anos. Referem também que a maioria dos ensaios de caracterização da durabilidade, apresentam uma acção erosiva extremamente severa não reproduzindo de forma fidedigna as condições climáticas naturais. O melhor desempenho foi obtido nas misturas de solo+resinas, contudo estas apresentam o inconveniente de terem um custo muito elevado (8 vezes superior ao cimento). Outros autores (Bui *et al.*, 2008), avaliaram o

desempenho de 104 troços de paredes de taipa com e sem estabilização, expostos durante 20 anos a condições climáticas naturais (Figura 5.3).



*Figura 5.3: Troços de paredes de taipa expostos durante 20 anos aos agentes atmosféricos: a) Parede em terra estabilizada com 5% de cal; b) Parede em terra sem estabilização (solo misturado); c) Parede em terra sem estabilização (solo fino) (Bui et al., 2008)*

Estes autores referem que a a erosão média dos troços de paredes de taipa foi de 2mm (5% da espessura da parede). Sendo que essa erosão era de 6,4 mm (1,6% da espessura da parede), no caso das paredes estabilizadas com 5% de cal hidráulica. Resultados cuja extrapolação aponta para uma vida útil de 60 anos para as paredes de taipa com solo não estabilizado, o que

permitirá dispensar o uso de revestimentos. Por outro lado, a utilização de solo não estabilizado, permite ainda a sua reciclagem integral.

Atzeni *et al.* (1993) refere que a utilização de 2% por massa de cimento de um polímero acrílico, obtido por dispersão de 30% em água, permite reduções efectivas da capilaridade do solo estabilizado com cimento.

Heathcote (1995) sugere um valor entre 0,33 a 0,50 para o rácio da resistência húmida versus resistência em seco ( $R_h/R_s$ ), como um valor aceitável dependendo da severidade da chuva na zona em causa.

Jayasinghe& Kamaladasa (2007) analisaram a resistência à compressão de troços de paredes de taipa ( $108 \times 16 \times 63 \text{cm}^2$ ), estabilizados com 6% de cimento, os quais foram imersos em água durante 24 e obtiveram valores para o rácio  $R_h/R_s$  entre 0,46 a 0,64 (Tabela 5.1).

**Tabela 5.1:** Rácio ( $R_w/R_s$ ) em paredes de taipa (Jayasinghe& Kamaladasa, 2007)

Solo	Cimento (%)	$R_h$	$R_s$	$R_h/R_s$
Solo laterítico	6	1,3	2,03	0,64
Solo argiloso	6	0.85	1,82	0,46

## Ensaio de Avaliação da Durabilidade

A avaliação da durabilidade das construções em terra, pode ser efectuada de forma indirecta através da análise da resistência à compressão ou da permeabilidade, também com ensaios de desgaste ou ao impacto mecânico ou de queda de água gota a gota (Tabela 5.2). Um outro conjunto ensaios que permitem uma simulação da erosão em modo acelerado, respeitam à utilização de um jacto de água (Heathcote, 2002).

**Tabela 5.2:** Avaliação da durabilidade das construções em terra (Heathcote, 2002).

Ensaio	Tipos de ensaios		
	Indirectos	Simulação	Erosão acelerada
Resistência à compressão	x		
Resistência superficial	x		
Permeabilidade	x		
Desgaste	x		
Queda de água gota a gota	x	x	
Jacto de água			x

É obviamente discutível que os ensaios de desgaste e de queda de água não sejam no entender do autor referido, considerados como ensaios de desgaste acelerado.

#### Ensaio “Geelong Test”

Entre os ensaios de erosão para provetes de terra, o ensaio Geelong foi especificamente concebido para provetes de adobe (Walker, 2000). No entanto Brito (2008) refere a possibilidade da sua utilização em provetes de taipa com 300×300×125mm. O ensaio consiste em fazer cair sobre um provete inclinado 30°, uma determinada quantidade de água, gota a gota, de uma altura de 400mm com recurso a um feltro embebido num recipiente de água. O ensaio termina quando o volume de água pingada for de 100ml, o que deve acontecer ao fim de 30 minutos (NZS, 1999, 1999a). O grau de erosão é dado pela profundidade do desgaste provocado pela queda da água no bloco de terra, sendo que para profundidades superiores a 15mm se considera que os provetes devem ser rejeitados.

Achenza & Fenu (2006) utilizaram o “Geelong Test” em provetes de terra estabilizados com polímeros naturais, não tendo aqueles revelado qualquer desgaste. Estes autores observaram uma profundidade do desgaste de

desgaste de 2mm, quando os provetes foram sujeitos novamente ao mesmo ensaio.

### Ensaio acelerado de erosão SAET.

O ensaio consiste em deixar cair um fio de água durante 10 minutos, sobre um provete inclinado a 30°, a partir de um reservatório a 1500 mm da superfície do provete. Os resultados do desgaste são obtidos a partir da profundidade de desgaste provocada pela queda de água, sendo que os provetes com uma profundidade de desgaste superior a 30mm são considerados não aptos.

Relativamente aos ensaios de erosão acelerada, que passam pela aplicação de um jacto de água contra os provetes de terra, foram desenvolvidas nos últimos 50 anos diversas variantes para o efeito que se apresentam na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3:** Ensaio de erosão acelerada com jacto de água (Maniatidis & Walker, 2002)

	Distância (mm)	Pressão (kPa)	Jacto	Tempo (minutos)
Israel (Cytryn, 1955)	250 vert.	50	Spray	33
Austrália - CSIRO	470 vert.	50	Spray	60
Dep. Housing Washington	175 hor.	137	Chuveiro	120
Norton	180 hor.	137	Chuveiro	120
Houben & Guillaud	200 hor.	140	Chuveiro	120

### Ensaio acelerado de erosão Bulletin 5

Este ensaio foi desenvolvido na Austrália no início da década de 80 e tem o nome do documento onde estava incluído. O ensaio consiste na aplicação de um jacto de água horizontal a uma pressão de 50 KPa (o que corresponde a uma velocidade de 10 m/s), durante 1 hora ou até o grau de erosão atravessar o provete (Figura 5.4a). A cada período de 15 minutos interrompe-se o teste para medir a profundidade da erosão. A profundidade

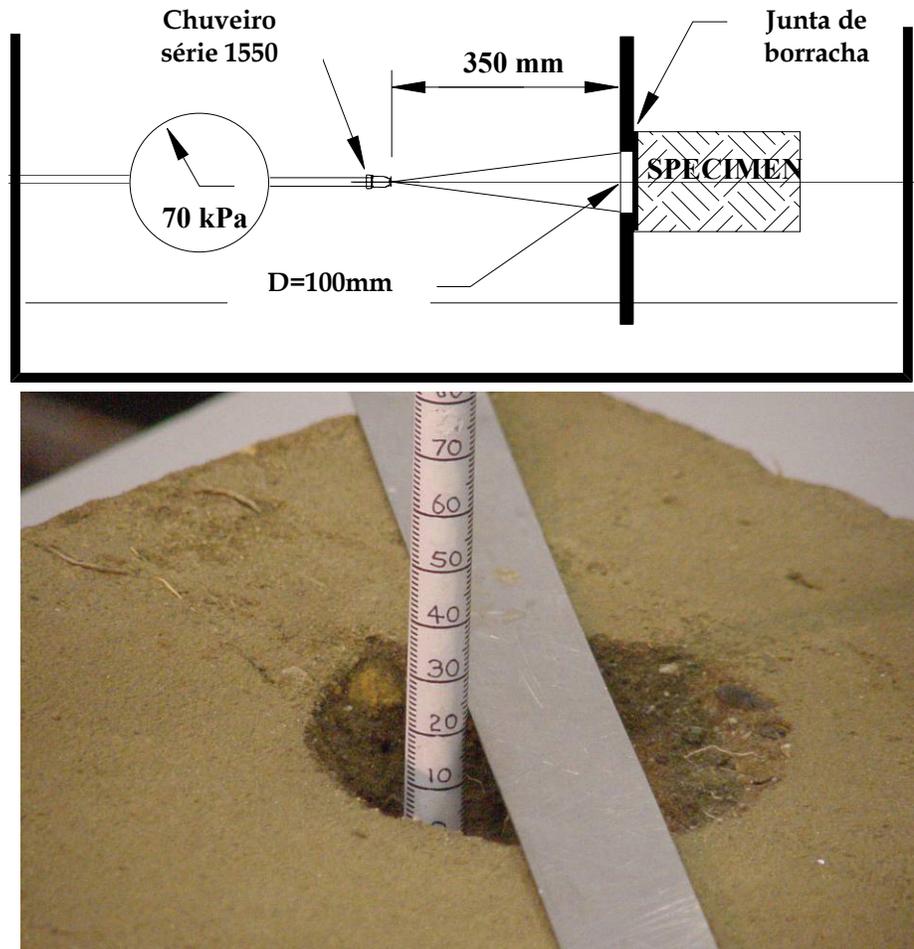
da erosão ao fim uma hora é expressa em mm por minuto. Heathcote& Moore (2003), afirmam no entanto que este ensaio não reproduz a acção da chuva pois o seu efeito é muito intenso e localizado deixando buracos nos provetes (Figura 5.4b).



*Figura 5.4: Ensaio scelerado de erosão Bulletin 5: a) Equipamento; b) Provede erodido (Heathcote& Moore, 2003)*

#### **Ensaio acelerado de erosão - University of Technology Sydney (UTS)**

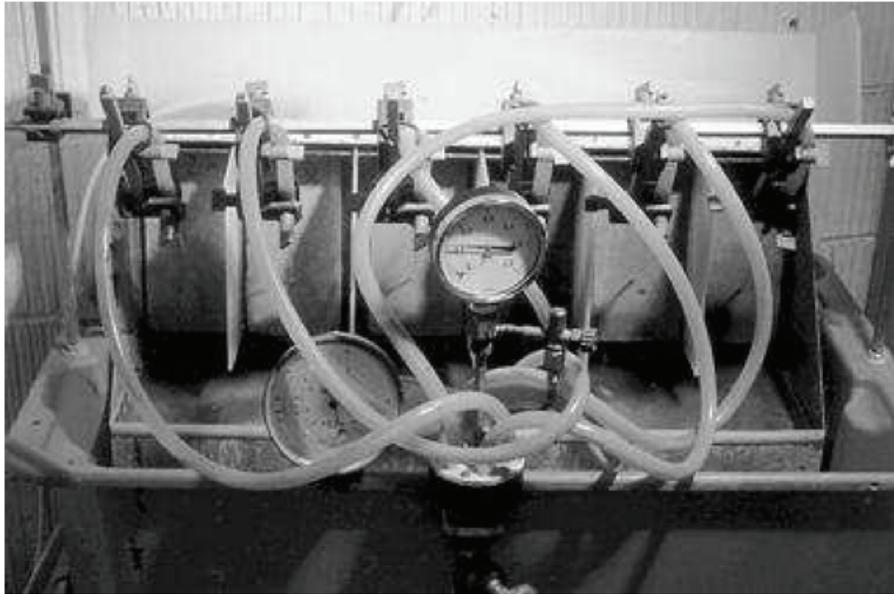
O ensaio UTS levado a cabo por Heathcote& Moore (2003), é um aperfeiçoamento do ensaio Bulletin 5, que embora utilizando um pressão de água superior produz um efeito erosivo mais distribuído em virtude da utilização de um tipo específico de chuveiro (Figura 5.5).



*Figura 5.5: Ensaio acelerado de erosão UTS (Heathcote & Moore, 2003)*

Estes autores sugerem que com este ensaio, pode estimar-se a profundidade da erosão sofrida pela parede durante uma vida útil de 50 anos, que será igual ao dobro da obtida no ensaio durante 120 minutos.

Minke (2007) sugere um ensaio de erosão acelerado que permite o ensaio de 6 provetes em simultâneo, com recurso a mangueiras de 6mm de diâmetro e uma velocidade de 3,24 m/s, que segundo o autor pretende simular as condições de chuva mais severas na zona Europeia (Figura 5.6).



*Figura 5.6: Ensaio acelerado de erosão (Minke, 2007)*

Minke afirma que para o ensaio referido, bastam 4 minutos para iniciar a erosão num solo estabilizado, sendo necessários 60 minutos para produzir a mesma acção num solo estabilizado. Este autor refere ainda que solos estabilizados com 6% de óleo de linhaça sujeitos ao ensaio de erosão acelerado não mostraram qualquer sinal de erosão mesmo após 7 dias de ensaio.

### **Durabilidade a ciclos gelo-degelo**

O principal procedimento experimental usado para aferir o desempenho das construções de alvenaria de taipa estabilizadas com cimento é a especificação ASTM D560 (1989). Neste ensaio submetem-se provetes saturados de taipa a 12 ciclos de gelo/degelo. Após cada ciclo de degelo é feita a remoção das partículas soltas e no fim do ensaio avalia-se a percentagem de perda de massa, se esta for inferior ao valor especificado os provetes são considerados aptos (Maniatidis & Walker, 2003).



# 6

## Revestimentos

**Considerações Prévias**

**Aderência ao Suporte**

**Resistência Mecânica**

**Porosidade, Absorção e Permeabilidade ao Vapor**

## Considerações Prévias

Não existe uma regra geral de aplicação de revestimentos na construção em terra. Essa utilização faz mais sentido em zonas onde as construções em terra estejam mais expostas á acção erosiva da água da chuva. A vertente tradicional da construção em terra em Portugal, mais especificamente na vertente da alvenaria de taipa fazia uso de revestimentos exteriores, nas zonas habitacionais, sendo que as zonas da habitação reservadas a arrumos ou de alojamento de animais ficavam à vista (Figura 6.1a). Já as construções correntes de alvenaria de taipa optam pela solução de acabamento sem revestimento, sendo essa uma opção que pretende valorizar e tirar partido da originalidade deste tipo de construção (Figura 6.1b).



*Figura 6.1: Alvenaria de taipa: a) Solução tradicional com revestimento somente na parte habitacional; b) Solução contemporânea sem revestimento*

Segundo Mateus (2006), os revestimentos da construção em terra devem cumprir os seguintes critérios:

- Módulo de elasticidade igual ou menor ao do suporte;
- Resistência à compressão e flexão iguais ou menores aos do suporte;
- Permeabilidade ao vapor de água igual ou menor ao do suporte;
- Teor de sais nulo ou mínimo;
- Trabalhabilidade aceitável sem adição excessiva de água;
- Baixa retracção

A espessura dos revestimentos das construções em terra varia entre 15 a 30mm, executados em duas ou três camadas ou por vezes numa só camada. Facto compreensível, já que sendo as argamassas de revestimento à base de cal aérea, o seu endurecimento é bastante lento. Tendo em conta que tradicionalmente estes revestimentos eram objecto de caição numa base anual, ao fim de algumas dezenas de anos este processo será responsável pela formação de uma camada de espessura não negligenciável (Figura 6.2).



*Figura 6.2: Alvenaria de taipa revestida com pintura por caição.*

Eusébio (2001) refere a utilização na zona de Serpa, de rebocos para construções em taipa constituídos por um traço de 1:1:5 (cal hidráulica:terra:areia). Este autor refere que o revestimento das paredes de taipa deve fazer-se em duas camadas, uma primeira mais forte que assegure a ligação ao suporte. E uma segunda mais fraca com menos cal, para não descolar da primeira.

Embora de endurecimento bastante mais rápido, a utilização de revestimentos à base de cimento é no entanto fortemente desaconselhada para o caso em apreço. Quer devido à sua elevada retracção, baixa permeabilidade ao vapor de água, elevada rigidez, mas também pelo seu teor de sais solúveis. Além disso alguns autores, analisaram o comportamento de misturas de cinzas volantes, resíduos de tijolo e cal, para revestimentos de paredes de terra, observando a perda de massa após a imersão em soluções ácidas, tendo concluído serem estas mais duráveis do que as misturas à base de cimento (Degirmenci & Baradan, 2005).

## Aderência ao Suporte

Segundo Eusébio (2001), os principais factores que dificultam a aderência do reboco à construção em taipa, são os seguintes:

- Suportes demasiado absorventes
- Suportes demasiado planos
- Suportes com superfícies não coesivas
- Suportes quimicamente incompatíveis com as argamassas de reboco.

Este autor sugere que o suporte deve ser poroso para permitir a entrada do revestimento, embora deva ser pouco absorvente para evitar que retire água em excesso do reboco. Pelo que os revestimentos à base de cal são mais indicados que aqueles que utilizem cimento, pois os primeiros tem uma maior retenção de água. Tradicionalmente a melhoria da aderência dos

rebocos às paredes de taipa era conseguida ou com cavilhas cravadas na taipa que ancoravam o reboco, ou com a colocação de algumas pedras na face dos taipais exteriores. Rodrigues (2005) observa que antes da aplicação da primeira camada de argamassa deve aplicar-se uma demão de água de cal, para efeitos de consolidação da própria alvenaria.

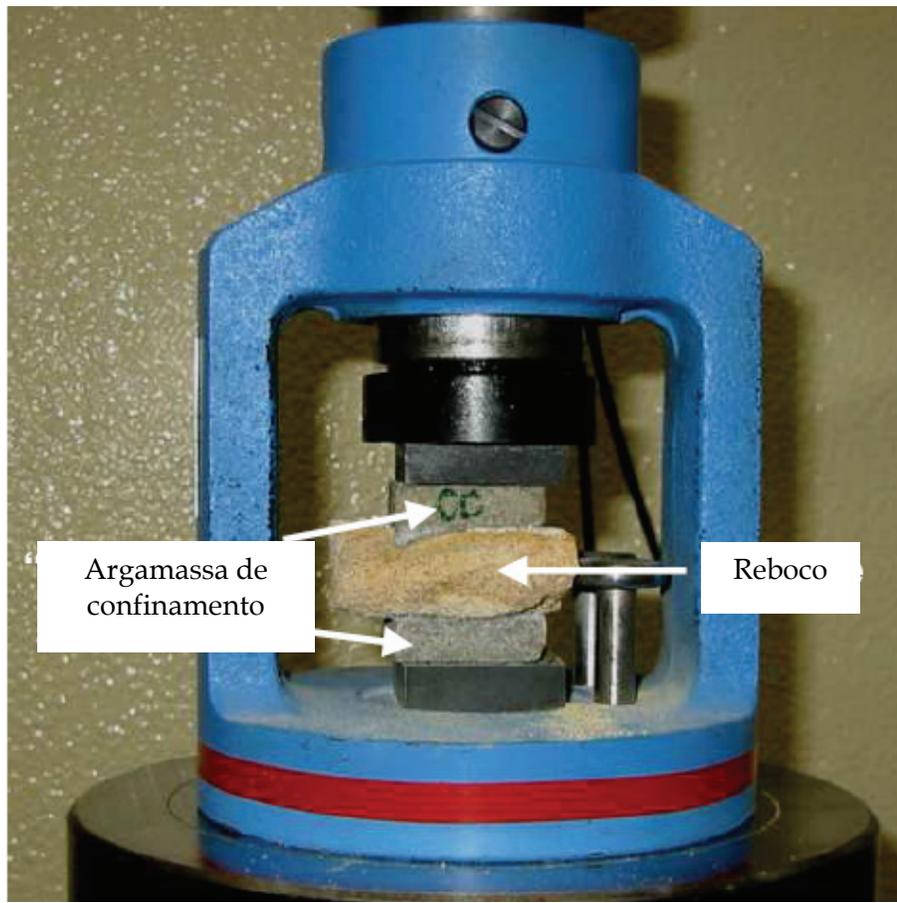
Já Mateus (2006) refere que tradicionalmente na região do Barlavento Algarvio se permitia que as construções em taipa sofressem a incidência da água da chuva durante os primeiros dois anos a construção, para que houvesse uma lavagem de finos da superfície com o conseqüente aumento da porosidade o que contribuía para um aumento da aderência do revestimento. Este autor sugere ainda

Shittu (2008) revela que a utilização de argamassas à base de cimento tem efeitos desastrosos, pois como essas argamassas são muito mais fortes que os adobes pelo que não há uma aderência adequada entre os dois materiais, o que leva a fenómenos de erosão acelerada.

## Resistência Mecânica

Em termos mecânicos os revestimentos das construções em terra, devem ser mais “fracos” que o suporte no qual estão aplicados, para evitar que ocorra rotura por corte devida à retracção do revestimento. Este facto torna obviamente desaconselhável a utilização de revestimentos à base de cimento, devido à sua resistência mecânica e também à sua elevada retracção.

A análise da resistência à compressão de fragmentos de argamassas antigas das construções em terra, pode ser levada a cabo com uma argamassa de confinamento ao traço 1:3, de forma a conferir à amostra antiga, dimensões regulares de 40x40mm<sup>2</sup> (Figura 6.3)



*Figura 6.3: Ensaio de resistência à compressão de revestimentos antigos  
(Magalhães & Veiga, 2007)*

Mateus (2006) analisou a resistência mecânica de revestimentos utilizados em alvenaria de taipa de construções da região do Barlavento Algarvio, obtendo uma elevada correlação entre a resistência à compressão obtida em laboratório e os resultados obtidos *in situ* com recurso ao esclerómetro pendular (Figura 6.4), o que mostra bem da fiabilidade deste tipo de ensaio. Os resultados obtidos, apresentam uma variação bastante significativa entre 2 e 4 MPa, o que ficará a dever-se quer à sua idade, mas também a um determinado nível de influência associado à dimensão da amostra e à especificidade da utilização da referida argamassa de confinamento para se proceder ao ensaio de resistência à compressão.

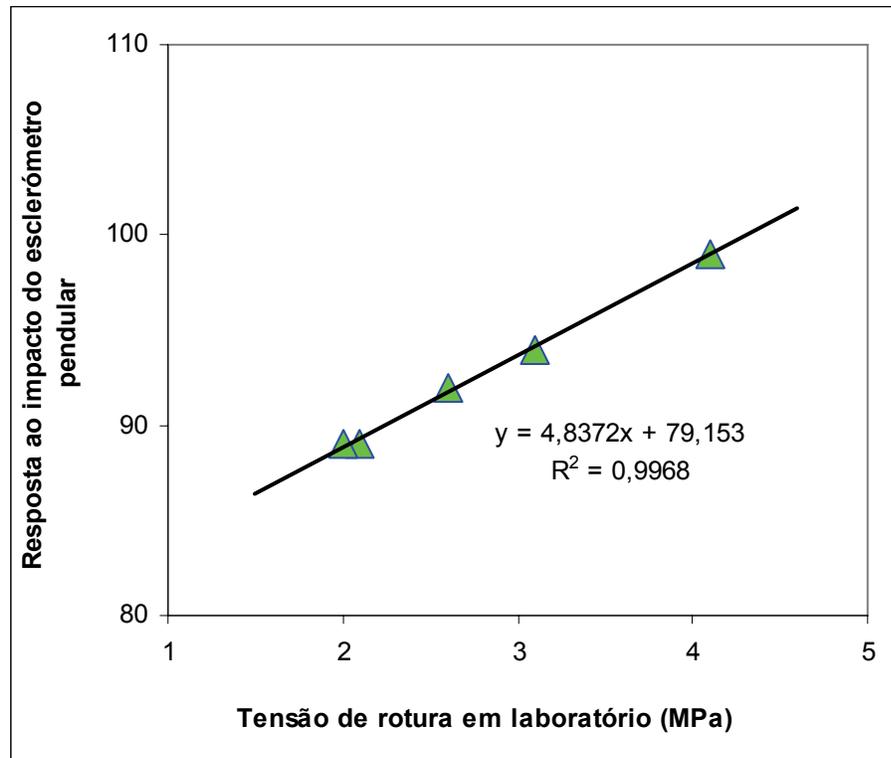


Figura 6.4: Resistência à compressão de revestimentos-Correlação de ensaios in situ com ensaio em laboratório (Mateus, 2006)

Os resultados da resistência à compressão dos revestimentos referidos por aquele autor, são todos bastante superiores à resistência mecânica das alvenarias de taipa (Tabela 6.1)

Tabela 6.1: Comparação da resistência à compressão do revestimento e do suporte em taipa (Mateus, 2006)

Local	Resistência à compressão (MPa) valor médio de 3 amostras	
	Suporte	Revestimento
Sesmarias	1,1	2,1
Arão	1,3	2,6
Montes de Cima	0,8	3,1
Pincho	1,3	2,0
Porches	2,7	4,1

A determinação da resistência à compressão dos provetes de taipa, foi levada a cabo recorrendo também a uma argamassa de confinamento, de forma a garantir uma base de pressão de  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ , sendo que este tipo de procedimento pode influenciar os resultados em função, quer da forma da amostra quer da heterogeneidade da sua composição, a qual é bastante maior para a amostra de taipa.

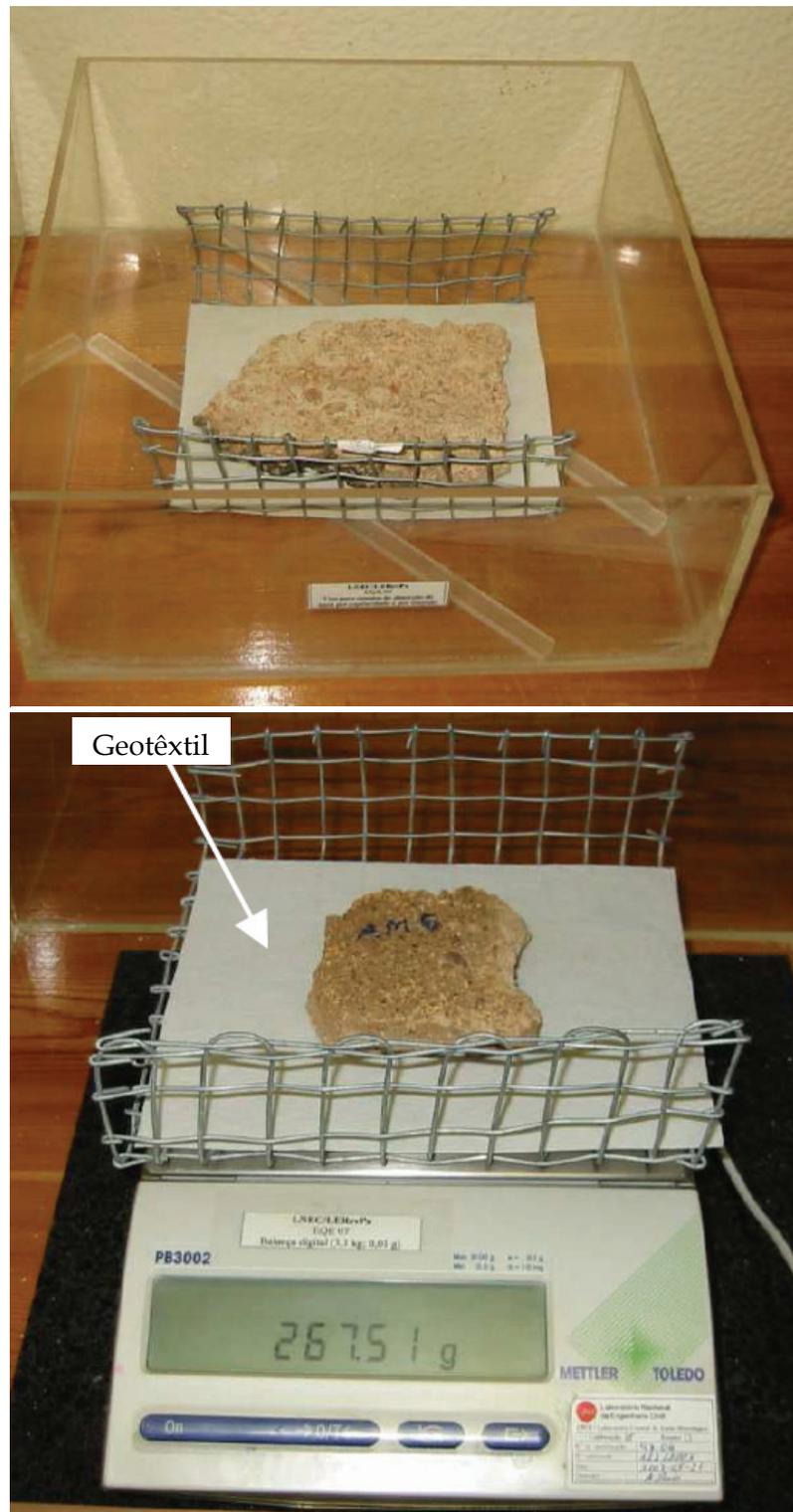
## Porosidade, Absorção e Permeabilidade ao Vapor

Os revestimentos das construções em terra devem ser suficientemente permeáveis para permitir as trocas de vapor através das paredes, sob pena de ocorrer descolamento do reboco em virtude das pressões geradas por essa impossibilidade (Rodrigues, 1993).

Na gíria costuma dizer-se que é necessário que as paredes de alvenaria possam “respirar”, o que por exclusão de partes também se aplica aos revestimentos. A permeabilidade do revestimento permitirá inclusive a secagem da água que tenha ingressado na alvenaria devido à ocorrência de alguma chuvada

Estes factos implicam por isso que os revestimentos à base de cal são os mais adequados para aplicação na construção em terra, pelo facto de serem bastante permeáveis ao vapor. Também a solução de revestimento por caiação é admissível, sabendo-se no entanto que essa opção implica operações de manutenção mais frequentes.

Alguns autores (Veiga & Júnior, 2000; Magalhães *et al.*, 2004; Magalhães & Veiga, 2007), sugerem que a análise da absorção de água por capilaridade de revestimentos antigos deva ser feita utilizando uma tela geotextil, já que sendo as amostras bastante friáveis, não é aconselhada a sua imersão em água ainda que parcial (Figura 6.5).



*Figura 6.5: Absorção de água por capilaridade (de contacto) em revestimentos antigos (Magalhães & Veiga, 2007)*

Mateus (2006) analisou a absorção de água por capilaridade em revestimentos de construções em terra do Barlavento Algarvio, os quais se apresentam na Tabela 6.1:

**Tabela 6.2:** Coeficientes de capilaridade por contacto (Mateus, 2006)

	Coeficiente de capilaridade por contacto (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )		
	Cc 5	Cc90	Cc24h
Sesmarias 16mm - uma camada Porosidade=23,9%	0,57	0,14	0,08
Arão 18mm - 2 camadas P=22,8%	0,35	0,33	0,1
Montes de Cima 18mm - 1 camada P=34,2%	1,69	0,36	0,22
Pincho 20mm - 2 camadas P=21,6%	0,67	0,21	0,11
Porches 14mm - 1 camada P=19,4%	0,89	0,03	0,06

Este autor entendeu aconselhável calcular os coeficientes de capilaridade para 5 minutos, 90 minutos e 24 horas. Os resultados da absorção de água por capilaridade de contacto evidenciam para todos os casos analisados, um elevado nível de absorção nos primeiros 5 minutos, expectável em materiais muito friáveis.

Com excepção dos revestimentos da habitação localizada em Montes de Cima que apresenta um valor bastante elevado de absorção de água às 24 horas de 8,2kg/m<sup>2</sup>, os restantes casos apresentam valores às 24 horas entre 2,4 e 4kg/m<sup>2</sup>. Muito embora a habitação de Montes de Cima, apresente o maior valor de porosidade (34,2%), que pode parcialmente explicar a sua

elevada absorção, para os restantes casos não há uma relação evidente entre a porosidade e a absorção capilar.



# 7

## Diagnóstico das Principais Patologias

Patologias Estruturais  
Patologias Não Estruturais

## Patologias Estruturais

As principais patologias de origem estrutural incidem no mau funcionamento das fundações, outro tipo de patologias estruturais diz respeito às zonas de concentração de tensões e também a situações colapso ou degradação mecânica da cobertura.

### Fundações

As patologias da construção em terra com origem no mau funcionamento das fundações, estão relacionadas com casos de edifícios com uma ou várias centenas de anos, cuja fundação consiste somente num lintel de alvenaria de pedra que corria ao longo do comprimento da parede. Executada na maior parte das vezes sem qualquer ligante e não possuindo um comportamento rígido, qualquer assentamento desta fundação se repercutia em elevada fissuração das paredes.

A ocorrência de vibrações provocadas pela circulação de máquinas agrícolas é outra das razões para a ocorrência de assentamentos diferenciados da fundação resultando em fendilhação ao nível das paredes (Antunes, 2008).

Outros factores para o mau funcionamento das fundações estão relacionados com fenómenos de erosão da fundação pelos agentes atmosféricos quando exposta por qualquer escavação periférica (Eusébio, 2001).

### Paredes resistentes

As cada vez mais frequentes operações de substituição de pavimentos de madeira por lajes em betão levam a elevados níveis de carregamento que resultam em paredes com deformações no seu próprio plano (abaulamento). Para lá do mau funcionamento das paredes das construções em terra com origem no mau funcionamento das fundações, existem os conhecidos casos de mau funcionamento mecânico das zonas de concentração de tensões,

particularmente nas aberturas (portas e janelas). A utilização tradicional nessas zonas de tijolos de barro cozido era uma forma de obstar a este problema (Figura 7.1).



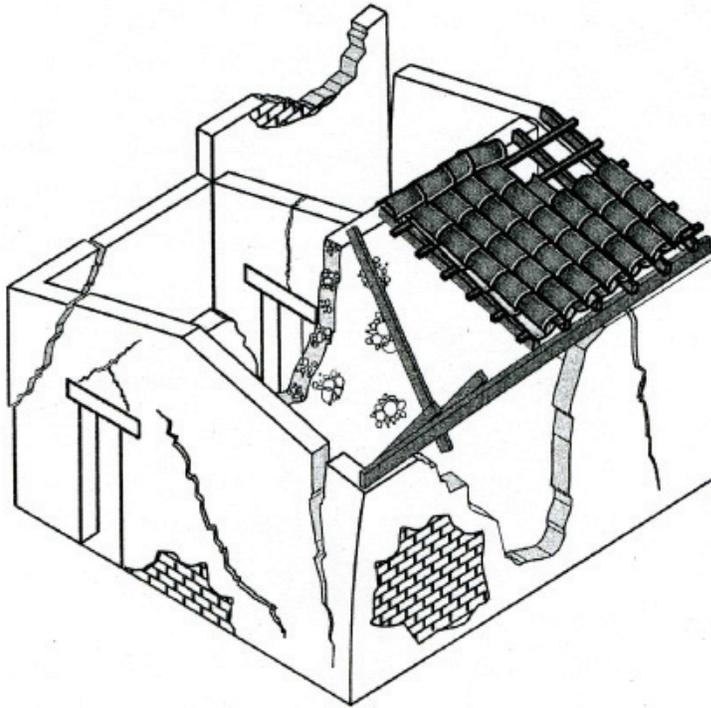
*Figura 7.1: Utilização de tijolos de barro cozido no confinamento do vão (Marques, 2002)*

Também o facto de muitas vezes não haver travamento das paredes ao nível dos cunhais, leva a que qualquer rotação da fundação implicasse o desligamento dos panos ortogonais (Figura 7.2).



*Figura 7.2: Desligamento de panos de parede por rotação da fundação*

Na Figura 7.3, apresentam-se algumas das patologias estruturais que é possível detectar numa construção em terra.



*Figura 7.3: Patologias estruturais em construções de terra*

## Coberturas

Ao nível das coberturas são frequentes as patologias devidas ao impulso destas nas paredes, agravadas por sua vez pela inexistência de um contraventamento no topo das paredes. Outras patologias provocadas pela estrutura da cobertura, com repercussões ao nível das paredes nas construções em terra, têm que ver com a existência de cargas concentradas provocadas por apoios de lajes de esteira com recurso a vigotas pré-esforçadas. O aumento da carga associado a estas lajes, agravado pela reduzida área de apoio das vigotas, cria uma tensão de compressão que levará inevitavelmente à fendilhação da parede.

Um outro tipo de patologias que não tem uma origem estrutural directa, tem que ver com a degradação mecânica das coberturas, deixando estas de servir o propósito de impedirem o acesso de águas e humidades ao interior das habitações, inclusive ao topo das próprias paredes, lugar privilegiado para que a acção da água inicie um ciclo de degradação destas paredes.

Antunes (2008) analisou 32 construções rurais (Montes) localizados na região de Évora, tendo constatado que na sua grande maioria tinha havido queda parcial ou total da cobertura, o que comprova bem que na maior parte dos casos é neste elemento construtivo que tem início a degradação deste tipo de edifícios.

Costa (2008) analisou as patologias em estruturas de madeira de habitações do Centro Histórico de Évora, onde a maioria das coberturas (88%) é composta estruturas simples sem asnas, similares às que são utilizadas nas construções em terra, apresentando-se na Tabela 8.1 esses resultados.

**Tabela 7.1:** Anomalias em elementos estruturais (Costa, 2008)

Tipo de Anomalia	%
Deformação	23
Sem anomalias	22
Vegetação ou líquenes	12
Retracção	12
Elementos com defeitos	12
Sujidade	3
Enegrecimento da superfície	3
Fractura	2
Juntas soltas ou abertas	2
Funcionamento deficiente	1
Destacamento	1
Passagem de água/infiltrações	1

## Patologias Não Estruturais

As principais patologias da construção em terra dizem respeito à acção da água da chuva nas paredes ou do solo em contacto com a fundação através de fenómenos de capilaridade. A acção da água provoca a perda de coesão do material constituinte das paredes de terra levando à sua rápida degradação (Figura 7.4).



*Figura 7.4: Erosão da base de uma parede em terra por acção da água*

Antunes (2008) refere que a altura das humidades ascensionais pode atingir quase 1,5 m, o que dá bem a ideia da gravidade deste tipo de patologia.

A acção da água pode ainda propiciar o aparecimento de espécies vegetais que aceleram a degradação das paredes em terra. Também as elevadas amplitudes térmicas responsáveis por ciclos de expansão e contracção contribuem igualmente para a degradação deste tipo de paredes.

Eusébio (2001) refere a existência de patologias que se devem a caixilharias de madeira que não cumprem requisitos mínimos de espessura, de perfis e samblagem, como contribuindo para o aparecimento das madeiras e posteriormente de humidades nas próprias paredes. Este autor também refere a ocorrência de casos de

descolamento de rebocos com cimento, provocada pela retracção da argamassa.

Lourenço (2002) cita o caso do bairro Domaine em Lion, o qual após um período de ocupação de mais de 20 anos, as construções em BTC não sofreram ainda quaisquer operações de manutenção, visto estarem em perfeitas condições. Já as paredes de taipa, foram objecto de reparações pontuais para corrigir patologias associadas a fenómenos de gelo-degelo, erosão por acção do vento e factores humanos.

Maniatidis & Walker (2003), referem a necessidade de se efectuarem verificações periódicas do estado da habitação, como forma de evitar a progressão e o agravamento de patologias.

**Tabela 7.2:** Lista de verificações periódicas (Costa, 2008)

<b>Elemento construtivo</b>	<b>Verificação</b>
Juntas	Limpeza, presença de vegetação
Impermeabilização contra as humidades ascensionais	Integridade da membrana de impermeabilização
Caixilhos de portas e janelas	Presença de humidades, dificuldades de abertura
Rede de drenagem de águas	Fugas, roturas, limpeza de algerozes
Pavimentos	Erosão, humidades
Telhados e varandas	Integridade estrutural
Vegetação	Presença de vegetação junto à habitação
Paredes	Fissuras, erosão, humidades,

Neste tipo de construções são frequentes as patologias relacionadas com os revestimentos das paredes das construções em terra. Principalmente quando o revestimento se resumia a uma pintura por caiação, efectuada numa base anual, que é um revestimento com pouca aderência ao suporte e facilmente degradável. Outros casos estão associados à utilização de rebocos muito

fortes à base de cimento portland que fissuram por retracção (Antunes, 2008).

Salma *et al.* (2005) analisaram as patologias de uma habitação unifamiliar executada com alvenarias de solo - cimento após 10 anos de uso, concluindo pela existência de patologias pouco expressivas que basicamente se resumem a impactos acidentais nas alvenarias e algumas humidades em zonas com pouca incidência solar.

# 8

## Propostas de Reabilitação

Fundações

Paredes

Cobertura

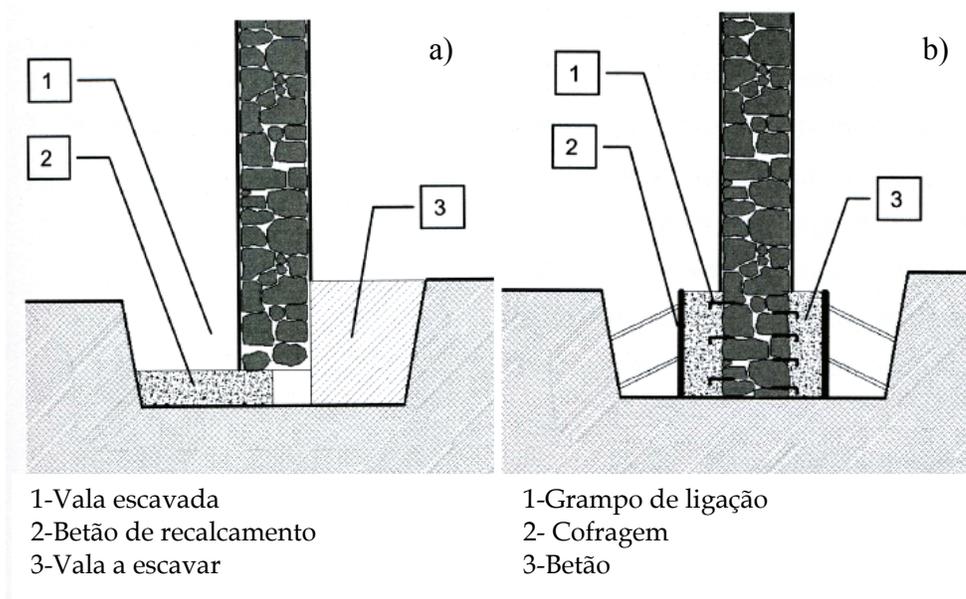
Reforço Estrutural

Revestimentos

Tratamentos de Humidades

## Fundações

A reabilitação das fundações de paredes de terra passa invariavelmente pelo recalçamento ou aumento da sua secção (Figura 8.1), a sua consolidação com ligantes e nos casos em que tal é possível com a subida da fundação em altura para evitar problemas decorrentes de humidades ascensionais. Esta opção contribui além disso e desde logo para um aumento da rigidez da estrutura e uma melhoria da sua estabilidade mecânica.



*Figura 8.1: Reabilitação de fundações: a) Recalçamento de alvenaria: b) Alargamento da fundação (Antunes, 2008)*

## Paredes

A reabilitação de paredes de terra deve ser precedida de uma análise da causa da sua degradação, tratando-se de degradação por fissuração e caso a sua causa tenha sido corrigida, a operação de reabilitação pode fazer-se com recurso ao preenchimento das fissuras com uma argamassa à base de terra (Figura 8.2).



*Figura 8.2: Preenchimento de fissuras em paredes de terra, Granada-Espanha (Jaquin, 2008)*

Para as construções em taipa, o simples preenchimento de fissuras não reproduz o grau de densidade da parede original, pelo que alguns autores, referem que a fissura deverá ser alargada para permitir essa operação (Jaquin, 2008).

Quanto á resolução das patologias devidas a concentração de tensões em aberturas, esta pode passar pela utilização nessas zonas, de ombreiras, vergas e peitoris em pedra ou em tijolo de burro.

Nas zonas onde tenha havido desgaste das alvenarias de taipa, a operação de reabilitação pode passar pela utilização de terra projectada com recurso a ar comprimido (Figura 8.3).



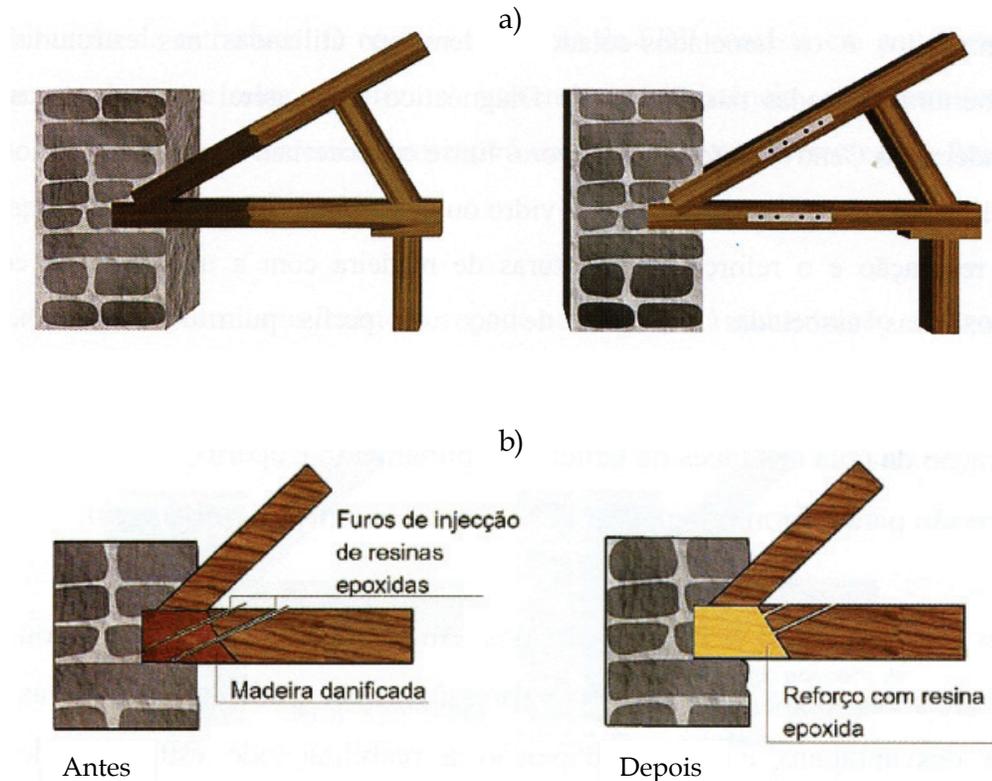
*Figura 8.3: Reabilitação de alvenaria com projecção de terra a alta pressão*

Neste método é feita uma projecção de uma mistura de terra com velocidades extremamente elevadas (300km/h), sendo esta operação executada em camadas sucessivas de baixa espessura (Silva & Costa, 2006).

## Cobertura

Muito embora a zona da cobertura saia fora do âmbito da construção em terra, é necessário ter em atenção que a opção por erradas soluções de reabilitação da cobertura, podem repercutir-se negativamente no comportamento das paredes de alvenaria de terra. Assim, ficam desde logo postas de parte as coberturas com elementos de betão pré-fabricados porquanto implicam uma sobrecarga excessiva para este tipo de paredes.

Sempre que possível deve tentar reabilitar-se a cobertura original, ou sendo essa opção inviável por causa de um elevado nível de degradação, deve fazer-se a sua substituição por uma outra cobertura em madeira. Relativamente aos apoios de asnas de madeira, degradados por apodrecimento ou outro tipo de patologia, a sua reabilitação pode ser feita por diversas formas, como por exemplo as apresentadas na Figura 8.4.



*Figura 8.4: Reabilitação de asnas de madeira: a) Madeira maciça com ligação metálica; b) Utilização de resinas epoxídicas (Antunes, 2008)*

## Reforço Estrutural

A fim de se evitarem problemas de concentração de tensões, deve sempre que possível optar por soluções de reabilitação que não recorram a lajes aligeiradas de betão. Contudo, a ser inevitável essa hipótese torna-se

necessário proceder à colocação de um lintel, que permita uma degradação de cargas uniforme ao longo da parede (Eusébio, 2001).

Solução similar deve ser igualmente utilizada quando a cobertura for executada com perfis de betão pré-esforçado, provocando esforços horizontais que devem ser devidamente restringidos (Figura 8.5)

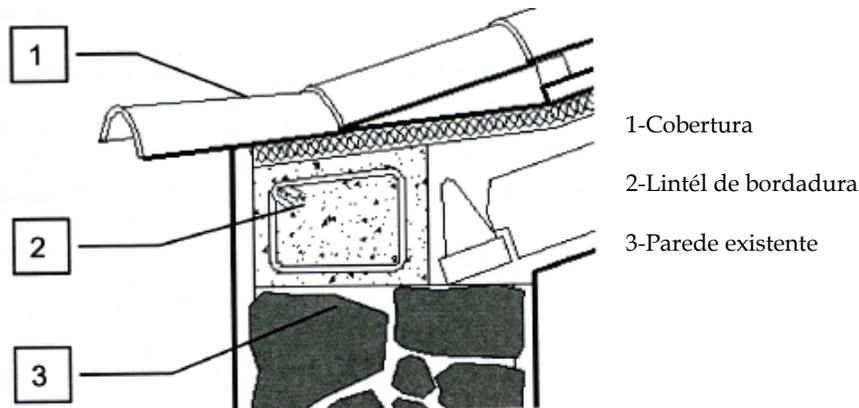


Figura 8.5: Lintel de reforço em betão (Antunes, 2008)

Não sendo possível a execução de uma viga de bordadura em betão armado, ou mesmo com esta e funcionando de modo complementar pode recorrer-se à utilização de cruzetas em paredes exteriores opostas, as quais são depois ligadas entre si com cabos de aço (Figura 8.6).

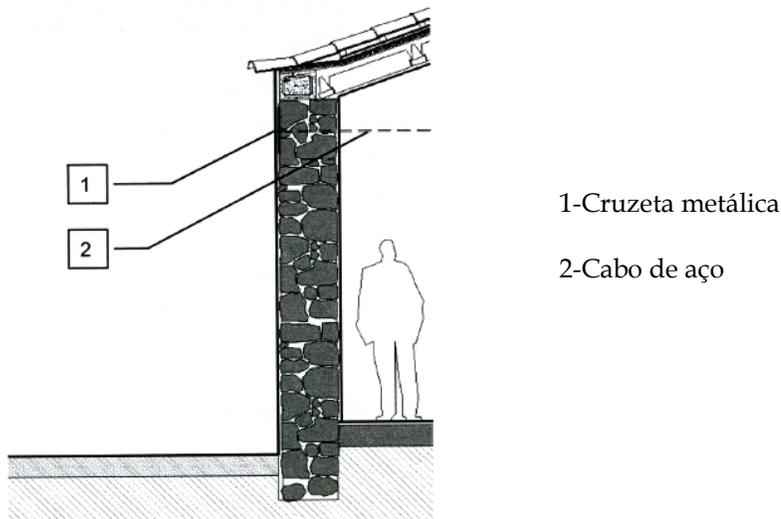


Figura 8.6: Reforço com cabos de aço (Antunes, 2008)

Para evitar problemas de circulação no interior da habitação, os cabos de aço devem passar no interior da habitação a uma altura superior a 2,7m, essa opção permite também que os cabos trabalhem junto da zona onde a cobertura descarrega nas paredes e logo o esforço horizontal é maior (Antunes, 2008). A solução de reforço estrutural pode também ser levada a cabo, pelo recurso à utilização de perfis metálicos (Figura 8.7).



*Figura 8.7: Reforço estrutural com perfis metálicos, Ambel-Espanha (Jaquin, 2008)*

## Revestimentos

A reabilitação dos revestimentos das construções em terra, deve fazer-se tendo em atenção as considerações já tecidas no capítulo 6, sobre os factores

que propiciam a boa compatibilidade entre estes materiais e os suportes nos quais são aplicados. Ou seja, devem utilizar-se argamassas à base de cal e em caso algum à base de cimento. As argamassas devem ser aplicadas em várias camadas, possuir baixa resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e elevada permeabilidade ao vapor de água. Antes da reabilitação do revestimento torna-se necessário no entanto solucionar a causa que contribuiu para a degradação do revestimento.

## Tratamentos de Humidades

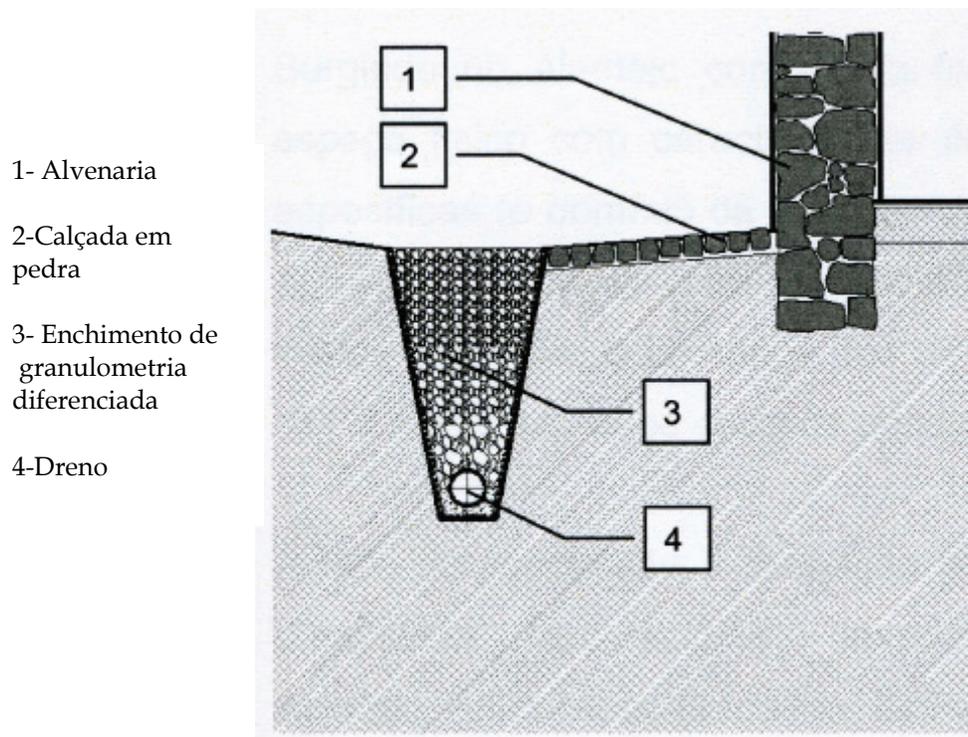
O tratamento de humidades em paredes de terra, é uma questão de resolução trabalhosa e dispendiosa quando se trate de casos de humidade por capilaridade. Nestas situações não é aconselhável a utilização de produtos hidrófugos por injeção, já que estes não garantem uma estanquidade absoluta. Quando possível a opção que permitirá melhores resultados a longo prazo envolve a subida da fundação até a uma cota de 0,70 m acima do solo (Figura 8.8).



*Figura 8.8: Reconstrução de parede de taipa com subida do lintel de fundação*

Uma forma de impedir a ocorrência de danos nas paredes devido à subida das humidades ascensionais passa pela colocação de uma barreira estanque imediatamente acima da fundação. Maniatidis & Walker (2003) referem a utilização de membranas para este fim, constituídas por pinturas betuminosas, faixas de polietileno, mastiques asfálticos e mesmo folhas de chumbo ou cobre.

A colocação de drenagem em volta da habitação de forma a afastar rapidamente a água das fundações paredes de alvenaria, é também uma medida que é aconselhada (Figura 8.9).



*Figura 8.9: Vala para drenagem de águas pluviais e freáticas (Antunes, 2008)*

Também o escoamento das águas da cobertura, deverá ser feito para que estas não se infiltrem junto às fundações, devendo ser redireccionadas para a referida vala drenante. Esta vala deve distar aproximadamente 1,5m das paredes exteriores, sendo preenchida com gravilha de geometria variável.



# 9

## **Considerações Económicas**

Que a construção em terra seja ou não mais económica do que a construção tradicional, não se julga que seja este um valor fundamental a condicionar

Que a construção em terra seja ou não mais económica do que a construção tradicional, não se julga que seja este um valor fundamental a condicionar esta opção construtiva, até porque se a mais-valia deste tipo de habitação é clara sob vários critérios ambientais e outros como se explana no último capítulo deste livro, manda o bom sendo que deva relativizar-se a vertente económica nesse contexto. Por outro lado, é preciso não esquecer que uma habitação que propicia condições de vida mais saudáveis, tanto física como psicologicamente, reflecte-se positivamente no rendimento profissional dos seus moradores, o que tem um valor económico não despreciando conquanto um pouco difícil de quantificar. Ainda assim os vários autores referidos neste capítulo, não encontram discrepâncias económicas significativas para a construção em terra, havendo até casos que relatam custos inferiores ao das soluções tradicionais.

Lourenço (2002) analisou os custos directos relativos à execução de uma pequena moradia de R/C, contemplando as seguintes variantes:

Caso 1: Moradia com estrutura em betão armado, alvenarias de tijolo furado cozido e laje de esteira em vigotas pré-esforçadas e abobadilhas.

Caso 2: Com realização de alvenarias portantes em BTC coroadas com lintéis em betão e com cobertura em com vigas de madeira

Caso 3: Com realização de alvenarias exteriores portantes em taipa, paredes interiores em adobe e com cobertura em com vigas de madeira.

Caso 4: Moradia com estrutura em betão armado e alvenarias só com funções de vedação executadas em adobe.

Esta autora concluiu que o caso 3 é aproximadamente 15% mais dispendioso do que o caso 1 correspondente à construção corrente. Contudo a variante 1 é no entanto 11% mais cara do que o caso 2, que possui alvenarias portantes em BTC, muito embora a redução do custo não tenha propriamente que ver com a diferença da solução construtiva adoptada mas antes pelo facto da solução 2, ter menores custos de betão armado e não possuir nem revestimentos nem pinturas exteriores.

Importa contudo ter em conta que a construção em terra, poderá necessitar de trabalhos de manutenção com mais frequência do que para a construção corrente (8 em 8 anos) nos termos do Regime jurídico da Urbanização e Edificação, nos termos do Dec Lei nº 60/2007 de 4 de Setembro. Esta autora refere a propósito o caso do bairro Domaine em Lion, com um período de ocupação de mais de 20 anos, no qual construções em BTC não sofreram ainda quaisquer operações de manutenção, visto estarem em perfeitas condições de conservação.

Oblíquas (2002) refere que na construção típica da Nigéria, os materiais representam 60% do custo dos edifícios, pelo que naquele caso específico a construção em terra, tem vantagens associadas do ponto de vista económico.

Maniatidis & Walker (2003) referem o custo da execução de paredes de taipa no Reino Unido, com uma espessura de 0,30 m varia entre 92 a 287 euros/m<sup>2</sup>, o que segundo os mesmos são valores competitivos quando comparados com outros tipos de alvenaria. Estes autores referem que a execução da cofragem influencia bastante o custo desta técnica construtiva chegando a representar 50% do custo final.

Segundo Soares *et al.* (2004) uma habitação com paredes de solo estabilizado com cimento tem um custo cerca de 30% inferior ao de paredes de tijolo cerâmico, contudo deve ter-se em conta que este autor se refere ao mercado

brasileiro, onde os custos de mão-obra são substancialmente inferiores aos praticados em Portugal. Para este autores

Beirão (2005) refere valores para o custo da alvenaria de taipa entre 5 a 10% acima do custo das alvenarias correntes de tijolo cozido, estes valores referem-se a rendimentos de mão-de-obra na execução de taipa entre 4 a 6 m<sup>2</sup>/dia (2 a 3m<sup>3</sup>/dia) para uma equipa de 4 pessoas. Esta autora cita testemunhos que dão conta que no passado, trabalhadores com uma elevada experiência neste tipo específico de construção, conseguiriam rendimentos de 7 a 8 m<sup>2</sup>/dia (3,5 a 4m<sup>3</sup>/dia) com o mesmo número de operários.

Aqueles rendimentos de mão-de-obra são no entanto muito distintos dos rendimentos apresentados por Pinho (2001), o qual refere que dois operários podiam executar 8m<sup>3</sup> de taipa em 12 horas de trabalho.

A Câmara Municipal de Odemira, desde 2005 que baixou para metade o valor das taxas de construção das habitações em taipa, o que constitui um incentivo económico de relevo na promoção deste tipo de habitação.

Wilson (2008) apresenta valores de venda de blocos de adobe, produzidos em moldes industriais respectivamente de 0,77 e 0,63 euros por unidade, consoante estes sejam ou não estabilizados, já para blocos de produção manual este autor refere valores que variam entre 0,7 e 0,46 euros por unidade. Os valores referidos são bastante elevados quando comparados com os blocos cerâmicos para alvenarias tradicionais e parecem ficar a dever-se ao facto da produção deste material estar concentrada em apenas alguns produtores, o que induz um aumento do custo por razões que não tem que ver tanto com os custos de produção mas mais com razões ligadas a uma escassez de oferta e um excesso de procura.

# 10

## Análise de Sustentabilidade

Considerações Prévias

Consumo de Recursos não Renováveis, Poluição e

Resíduos

Consumo de Energia e Emissões de Carbono

Toxicidade e Qualidade do Ar Interior

## Considerações Prévias

*"The first law of ecology: Everything is connected to everything else"* (Commoner, 1971)

Contrariamente às restantes espécies animais que procuram um equilíbrio com o sistema que lhe assegura a sua subsistência, por outro lado e em absoluto contraste a espécie humana tem no decurso da sua breve existência somente se preocupado com a satisfação imediata das suas "necessidades" independentemente das mesmas poderem provocar a exaustão e o colapso do ecossistema do qual são parte integrante.

As preocupações ambientais da sociedade actual começaram a ganhar relevo a partir da realização em 1972 da Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente em Estocolmo. Contudo somente em 1987 adquiriram uma perspectiva mais incisiva, a partir da publicação do Relatório "*Our common future*", mais mediatizado como relatório Bruntland (1987), e onde pela primeira vez aparece consignada a expressão do desenvolvimento sustentável, como aquele que "*permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas*". Posteriormente em 1992, na Conferência do Rio, em que estiveram presentes 176 países e 102 Chefes de Estado e de Governo, foram aprovados por unanimidade a Declaração do Rio sobre o Ambiente e Desenvolvimento, a Declaração de Princípios sobre as Florestas e a Agenda 21, bem como a Convenção sobre as Alterações Climáticas e a Convenção sobre a Diversidade Biológica (Fórum Ambiente, 2003). Em 1993 a União Europeia desenvolveu o 5º Programa para o Ambiente e Desenvolvimento, no qual se estabelece a necessidade de uma maior abrangência das políticas do ambiente. Em 1997 os países signatários do Protocolo de Quioto (UNFCCC, 1997), assumiram o compromisso de no seu conjunto reduzirem até 2012, as suas emissões de gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa (GEE),

em 5,2% relativamente ao nível de emissões no ano base de 1990. Pretendendo com isso estabilizar no ano 2012 os níveis de CO<sub>2</sub> para que a temperatura global média da Terra não excedesse 2 °C acima dos níveis pré-industriais (Fernandes *et al.*, 2004).

Tenha-se presente a este propósito que existem inúmeros estudos que apontam para uma elevada similaridade entre a evolução da temperatura média da Terra e o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>. Note-se que no início do século 18, o nível de concentração de CO<sub>2</sub> era de 280 ppm, actualmente já é de 430 ppm crescendo a um ritmo superior a 2ppm/ano, pelo que mantendo o nível de emissões actual (o que não é provável, atendendo ao rápido crescimento económico da China e da Índia, com os consequentes aumentos de taxas de emissões) isso implicará um nível de concentração de CO<sub>2</sub> de 550 ppm no ano 2050 (Stern, 2006). Esta subida de temperatura poderá a longo prazo provocar o colapso do bom funcionamento das correntes oceânicas (circulação termosalina), e a curto prazo e segundo um recente relatório do IPCC (2007) poderá provocar qualquer coisa como, 200 milhões de refugiados em consequência da provável subida do nível da água do mar.

Todo este contexto de uma invulgar urgência normativa, pretendeu institucionalizar e dar corpo às preocupações da comunidade científica que há já algumas décadas vinha alertando para a necessidade de se encarar de frente os desafios ambientais que enfrenta o planeta Terra, (cujo adiamento poderia vir a ditar o fim da civilização humana tal como a conhecemos), o qual imerso numa espiral de poluição parece caminhar (não sem uma certa ironia) no sentido de uma nova idade do gelo (Meadows *et al.*, 1972; Stern, 2006; World Watch Institute, 2009).

Constituindo um dos maiores e mais activos sectores em toda a Europa, a indústria da construção, representa 28,1% e 7,5% do emprego, respectivamente na indústria e em toda a economia europeia. Além disso a

nível mundial a indústria da construção consome mais matérias-primas (aproximadamente 3000 Mt/ano, quase 50% em massa) que qualquer outra actividade económica. Pelo que o previsível aumento da população mundial, (até ao ano 2030 espera-se que aumente mais de 2000 milhões de pessoas) e as necessidades implícitas em termos de construção de edifícios e outras infra-estruturas, agravará ainda mais o consumo de matérias-primas não renováveis, bem assim como a produção de resíduos. Só na Europa são objecto de extracção pela indústria mineira cerca de 3.000 milhões de toneladas anuais de material rochoso. Na Tabela 10.1, apresenta-se a título de exemplo, a quantidade de resíduos gerados pela indústria mineira durante a extracção de alguns metais utilizados pela indústria da construção.

**Tabela 10.1:** Geração de resíduos durante a extracção de alguns metais (Amoeda, 2003)

	Ferro	Alumínio	Níquel	Chumbo	Cobre	Zinco
<b>Metal extraído (%)</b>	40	30	2,5	2,5	1	0,05
<b>Rocha escavada (Mt)</b>	25 503	869	387	1077	11 026	1267

Como consequência, a União Europeia no âmbito de uma construção mais sustentável estabeleceu recentemente as seguintes metas:

- A médio prazo reconversão de 30% do parque edificado com:
  - Redução de 50% da energia;
  - Redução de 30% das matérias-primas;
  - Redução de 40% dos resíduos;
  - Materiais de Construção 100% recicláveis;
  - Resíduos de construção demolição aproveitados integralmente
- Até ao ano 2050
  - Construção de edifícios novos sem CO<sub>2</sub>
  - Parque edificado até 2005 reconvertido, com redução de 50% de consumo de energia e 75% das emissões de CO<sub>2</sub>

A utilização de materiais e técnicas construtivas mais sustentáveis constituem assim um contributo fundamental para a sustentabilidade da indústria da construção e por consequência para um desenvolvimento mais sustentável.

A construção em terra assume neste contexto particular uma mais-valia que a torna extremamente competitiva quando comparada com os materiais e técnicas construtivas correntes. No presente capítulo analisar-se-á o desempenho ambiental da construção em terra em termos das seguintes vertentes:

- consumo de recursos não renováveis, poluição e resíduos
- consumo de energia e emissões de carbono;
- toxicidade e qualidade do ar interior

## **Consumo de Recursos não Renováveis, Poluição e Resíduos**

A utilização de solo para a construção em terra embora não possa ser considerada como uma utilização de um recurso renovável, também tão pouco pode considerar-se como estando associada aos impactos tradicionais da actividade extractiva de materiais para o fabrico de cimento, para o fabrico de tijolos cerâmicos ou mesmo do aço, os quais produzem grandes depósitos de escombreiras e lagos de lamas, pois regra geral o solo utilizado na construção em terra localiza-se imediatamente abaixo da camada de terra vegetal.

Se assumirmos que o edifício é executado com solo localizado na sua proximidade, não há sequer poluição causada pelo transporte deste material. Já a utilização de alvenarias de tijolos cerâmicos ou de betão, cuja produção é muito localizada e raramente próximo das zonas de construção dos

edifícios de habitação, implicam sempre elevadas distâncias de transporte com os consequentes impactos em termos de emissões de poluentes gasosos.

No que respeita aos desperdícios da construção em terra (não estabilizados) estes podem simplesmente ser objecto de deposição do sítio da sua extracção sem qualquer perigo ambiental envolvido. Mesmo quando é objecto de estabilização com cal ou cimento, o solo pode voltar a ser reutilizado neste tipo de construção, pelo que se pode assim considerar que no tocante à parte de geração de resíduos, que a construção em terra praticamente não gera resíduos, com excepção daqueles que respeitam à utilização de outros materiais.

Em comparação a utilização tradicional de alvenarias de tijolo furado, implicam desperdícios relevantes deste material pois tratando-se de unidades monolíticas com 30 cm de comprimento (formatos 30×20×7, 30×20×11, 30×20×15, 30×22×20), é muito frequente a inutilização parcial de bastantes unidades de tijolo durante a execução das paredes de edifícios de habitação. Morton (2008) refere a possibilidade deste tipo de construção poder reaproveitar parte das 24 milhões de toneladas de solos residuais, produzidas anualmente pela indústria da construção no Reino Unido.

## **Consumo de Energia e Emissões de Carbono**

A crescente procura a nível mundial de energia é uma das causas para um desenvolvimento claramente insustentável. Estima-se que até ao ano 2030 a procura de energia deve crescer aproximadamente 50% (World Energy Outlook, 2008). Para lá daquilo que o consumo de energia representa em termos do uso de reservas fósseis não renováveis, a face menos visível e com mais impacto ambiental do consumo de energia está associada à queima de carvão e gásóleo para produção de electricidade nas centrais termoeléctricas

(Figura 10.1), representando essa opção um substancial contributo para o agravamento das emissões de carbono.



*Figura 10.1: Central termoelétrica do Carregado*

O panorama energético português é caracterizado por uma elevada dependência externa (importamos mais de 80% da energia que consumimos), o que contrasta bastante quer com outros países do Sul da Europa quer com o valor da média dos 27 países da UE (Figura 10.2)

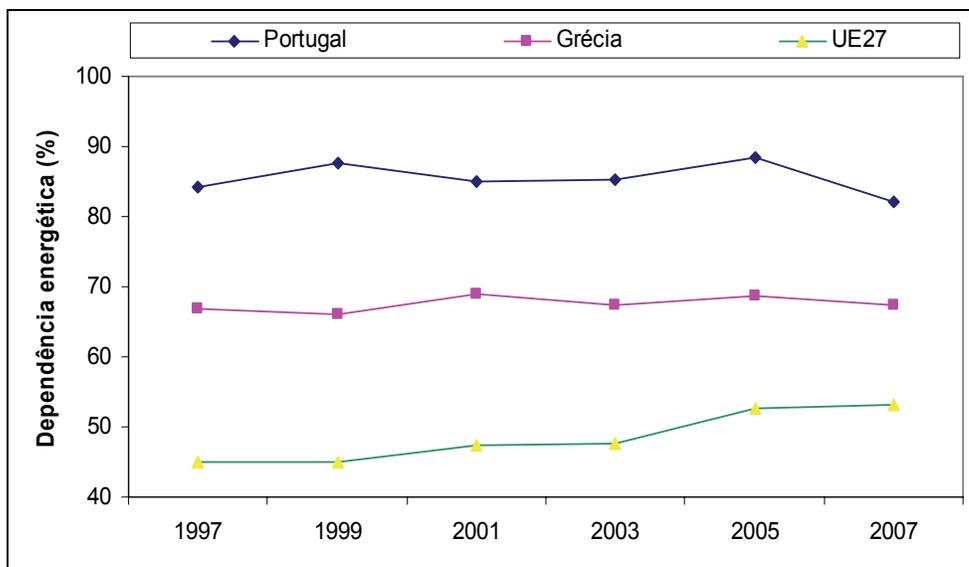


Figura10.2: Evolução temporal da dependência energética portuguesa (Eurostat, 2007)

Entre 1995 e 2005 a riqueza nacional aumentou 28%, contudo a factura de energia importada aumentou no mesmo período 400%, tendo crescido de 1500 milhões de dólares para 5500 milhões de dólares, e entre 2005 e 2007 esse valor passou para aproximadamente 10.000 milhões de dólares, o que compara muito desfavoravelmente com a média da EU27 (Figura 10.3).

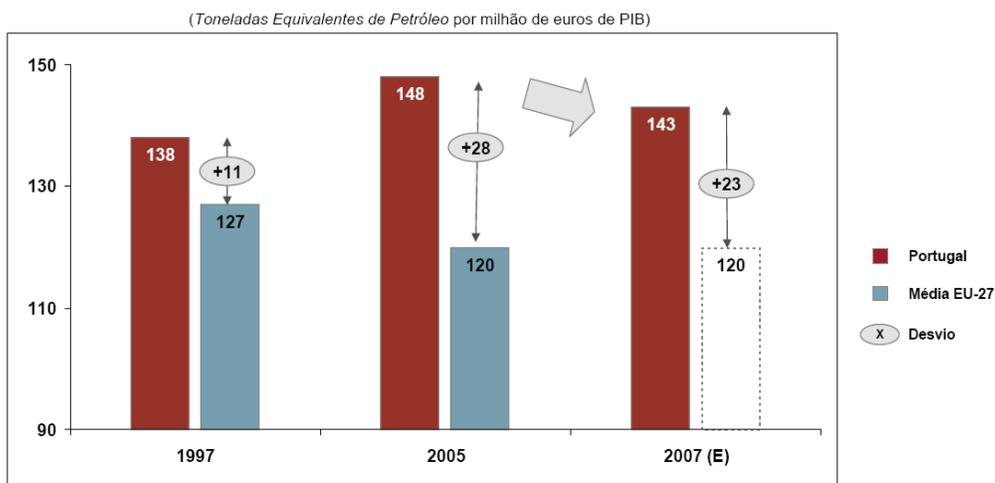
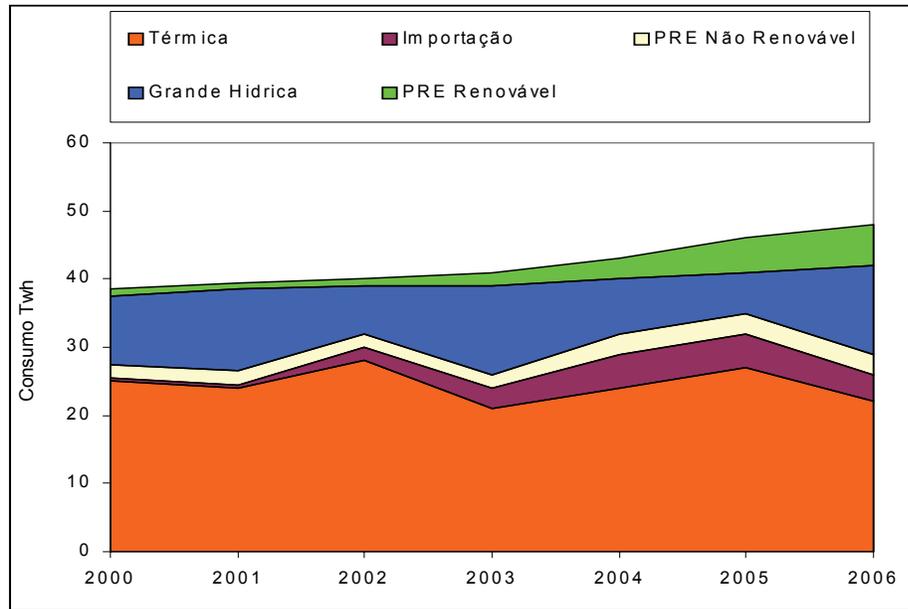


Figura10.3: Intensidade energética de Portugal e da média Europeia por unidade de PIB (PNAEE, 2008)

Esta questão é particularmente relevante no contexto nacional em que a energia produzida é preponderantemente de origem térmica, produzida em centrais termoelétricas (Figura 10.4).



*Figura 10.4: Origem do consumo de energia em Portugal (Fonte APREN/REN)*

Este panorama é agravado pelo fraco desempenho do nosso país em termos de conseguir cumprir as metas relativas às emissões de carbono, no âmbito do Acordo de Partilha de Responsabilidades (burden sharing agreement), definido no seio da Comunidade Europeia.

Este compromisso obriga alguns países a reduzir substancialmente os seus níveis de emissões, enquanto outros podem mesmo aumentá-las, como é o caso de Portugal que pode apresentar em 2012, um nível de emissões de GEE, 27% superior ao apresentado em 1990. Sendo o nível de emissões de CO<sub>2e</sub> (CO<sub>2</sub>equivalente, que já inclui todos os gases GEE) em 1990 de 60 milhões de toneladas (Mt) anuais, a meta individual para Portugal, de emissões para o ano 2010, significa um tecto máximo de 76 Mt, contudo em 2001 o nível de emissões de CO<sub>2e</sub>, já tinha atingido as 82 Mt, ou seja 36% acima do máximo permitido pelos compromissos assumidos.

Tendo em conta que o sector residencial consome ao longo de todo o seu ciclo de vida mais de 40% de toda a energia produzida (OCDE, 2003), facilmente se percebe o elevado potencial de poupança energética deste subsector e o que isso pode representar em termos de redução de emissões. Cepinha *et al.* (2007) defendem que facilmente se poderia reduzir 1/5 da energia consumida em Portugal no sector residencial, o que implicaria uma redução de 340 milhões de toneladas de dióxido de carbono (Cepinha *et al.*, 2007)

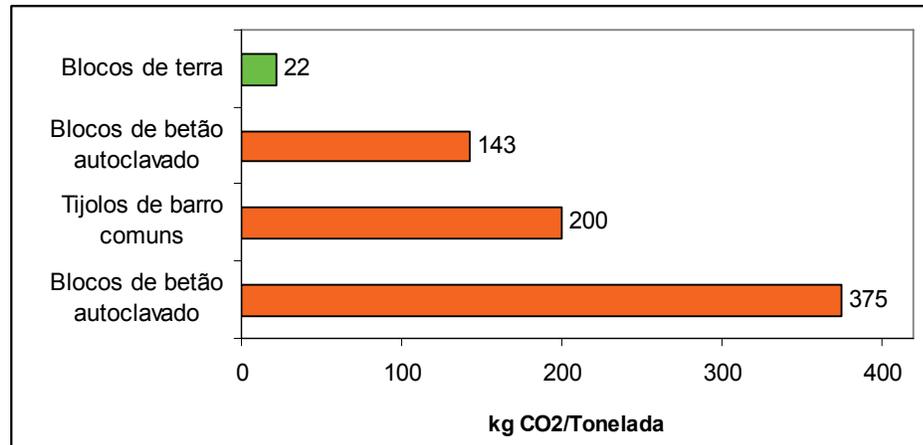
Alguns autores referem que os materiais de construção representam quase 17% da energia na construção de edifícios (Thomark, 2006). Outros autores apontam para reduções de quase 30% em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, devido a uma correcta escolha dos materiais de construção (Gonzalez & Navarro, 2006). A escolha adequada dos materiais de construção pode assim contribuir de forma decisiva para a redução da quantidade de energia necessária na construção de edifícios. A energia gasta em transporte de materiais de construção é um dos factores que contribui para o seu mau desempenho ambiental. Berge (2009) refere os seguintes valores de energia em termos de transporte dos materiais (Tabela 10.2)

**Tabela 10.2:** Energia gasta em transporte (Berge, 2009)

Transporte	MJ/ton Km
Avião	33-36
Rodovia (gasóleo)	0,8-2,2
Ferrovía (gasóleo)	0,6-0,9
Ferrovía (electricidade)	0,2-0,4
Barco	0,3-0,9

Um tal panorama implica necessariamente que se deva privilegiar a utilização de materiais locais, à semelhança daquilo que é o paradigma da construção em terra. Segundo Morel *et al.* (2001), a utilização de materiais locais permite poupanças energéticas para os edifícios de aprox. 453%.

A utilização de solo para a construção em terra envolve em termos gerais e basicamente, a remoção da camada superficial de terra vegetal não tem um impacto significativo em termos energéticos dado que é uma tarefa que pode ser efectuada em termos manuais. Alguns autores comparam as emissões de carbono de materiais correntemente utilizados na execução de alvenarias com as emissões equivalentes de blocos de terra, evidenciando o bom desempenho ambiental destes últimos (Figura 10.5)



*Figura 10.5: Carbono incorporado em materiais para alvenarias (Morton et al., 2005)*

Para uma habitação de 3 quartos com 92m<sup>2</sup> com paredes interiores em blocos de terra, os valores da Figura 10.5 representam uma redução de 24MWh ou 7 toneladas de CO<sub>2</sub> relativamente à execução das mesmas divisórias com tijolos de barro cozidos, ou uma redução de 14 toneladas de CO<sub>2</sub> face à utilização de blocos de betão autoclavado.

Quintino (2005), utilizando valores para o caso específico da produção de BTC em Portugal, a energia incorporada nos blocos fabricados em processo mecânico é de aprox. 100 kw/h por tonelada, valor muito inferior aos 1200 kw/h por tonelada dos tijolos normais cozidos em fornos.

Para Morton (2008) a substituição de apenas 5% de blocos de betão utilizados no Reino Unido, por alvenaria de terra implicaria uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 100.000 toneladas.

Segundo Sukla *et al.* (2008) as poupanças energéticas de uma habitação em adobe permitem uma redução de 100 toneladas de CO<sub>2</sub> anuais.

Lawrence *et al.* (2008) referem que a utilização de tijolos à base de areias, argilas e silicato de sódio apresenta vantagens ambientais relativamente aos tijolos cozidos, nos quais 85% da energia incorporada se fica a dever ao processo de queima. Segundo estes autores, o silicato de sódio tem uma reduzida pegada de carbono (60 Kg CO<sub>2</sub> /tonelada), sendo também económico (600 euros por tonelada de pó seco, o que equivale a 36 euros por tonelada de argamassa com uma concentração de 6% de silicato).

Contudo em Portugal dados recentes, indicam que a produção de silicato de sódio implica um consumo de energia de 270 kgep/ton. Aliás, o valor de 0,18 ton.de CO<sub>2</sub>, usualmente referido para as emissões do silicato de sódio, não inclui certamente as emissões associadas à sua produção expressos em termos de energia primária (kilogramas equivalentes de petróleo e em que 0,5 tep=1,724 Kwh de electricidade), os quais são bastantes elevados, quando comparados com os seus equivalentes relativos ao cimento portland.

Admitindo que o valor de 103 kgep, para a produção de cimento portland representa 0,39 toneladas de CO<sub>2</sub>, então para activar uma tonelada de um qualquer precursor aluminosilicatado, com 100% de activador alcalino (razão activador/ligante igual à unidade), no qual a relação mássica silicato/hidróxido fosse 2,5 tal implicaria um gasto de energia de 240 kgep, o que equivaleria a 0,91 toneladas de CO<sub>2</sub> que somadas às 0,18 ton. iniciais, equivaleriam a 1 tonelada de CO<sub>2</sub>.

Lourenço (2002) analisou os gastos energéticos relativos à produção dos principais materiais (madeira, betão, aço, tijolos cozidos e cimento), utilizados para a execução de uma pequena moradia de R/C, contemplando as seguintes variantes:

- Caso 1: Moradia com estrutura em betão armado, alvenarias de tijolo furado cozido e laje de esteira em vigotas pré-esforçadas e abobadilhas.
- Caso 2: Com realização de alvenarias portantes em BTC coroadas com lintéis em betão e com cobertura em com vigas de madeira
- Caso 3: Com realização de alvenarias exteriores portantes em taipa, paredes interiores em adobe e com cobertura em com vigas de madeira.
- Caso 4: Moradia com estrutura em betão armado e alvenarias só com funções de vedação executadas em adobe.

Tendo observado que a solução de construção corrente, implica para esses materiais um consumo energético que é mais do dobro do consumo associado às soluções 2 e 3 (Figura 10.6).

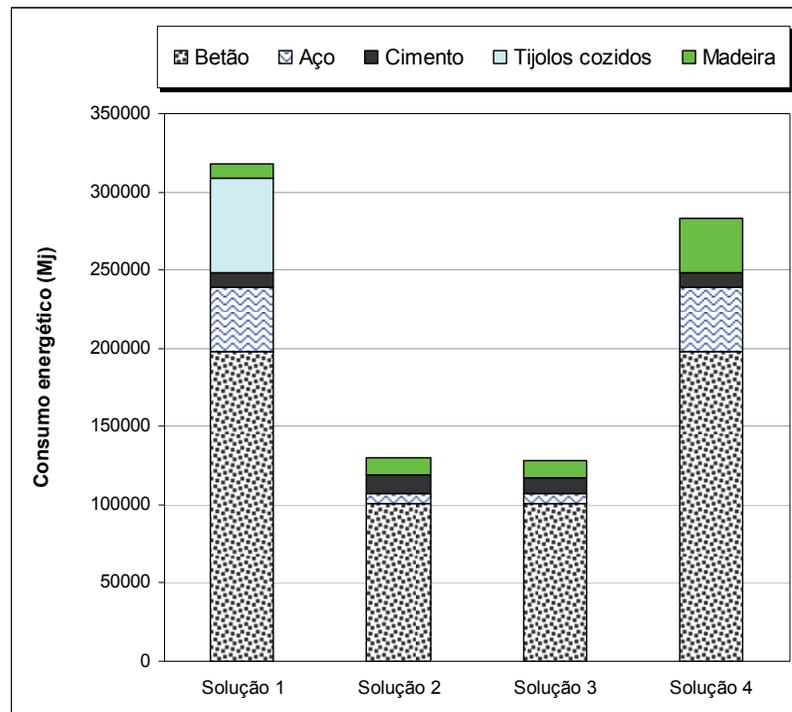


Figura 10.6: Consumos energéticos dos principais materiais (adaptado de Lourenço, 2002)

A mesma autora refere que os consumos energéticos relativos à ocupação dos imóveis são substancialmente superiores aos consumos energéticos para a sua execução, tendo simulado valores energéticos somente para as funções de iluminação, aquecimento com sistema central e arrefecimento com recurso a ar condicionado, de 22.728 MJ/ano.

Sukla *et al.* (2008) analisou habitações em adobe tendo obtido valores de energia incorporada de 475 GJ para cada 100m<sup>2</sup> de área construída com a seguinte distribuição:

- Estrutura - 102 GJ;
- Fundações - 214 GJ;
- Pavimentos - 55 GJ;
- Acabamentos - 5 GJ;
- Mobiliário - 18 GJ;
- Manutenção - 59 GJ;
- Instalação eléctrica - 4 GJ

Estes autores referem que embora a energia incorporada seja baixa, o valor para manutenção é significativo e corresponde a 12,5% do total, observam também que os gastos em aquecimento e arrefecimento ascendem a 370GJ.

## Toxicidade e Qualidade do Ar Interior

A construção em terra não está regra geral associada aos efeitos nocivos em termos de toxicidade da utilização de materiais sintéticos, os quais são responsáveis pela contaminação do ar interior com compostos orgânicos voláteis (VOCs).

Enquanto que as construções dos nossos antepassados eram feitas de materiais naturais, as construções correntes podem incluir quase 70.000 combinações de químicos, libertando para o ar interior quase 1000 produtos químicos. Nos Estados Unidos estimam-se em 60

bilhões de dólares os custos anuais relacionados com o problema dos “edifícios doentes” (Day, 2003).

Estes compostos podem provocar os seguintes problemas de saúde:

- Irritações da pele, olhos e vias respiratórias;
- Distúrbios cardíacos, digestivos, renais ou hepáticos;
- Dores de cabeça e mal-estar generalizado;
- Distúrbios do sistema nervoso, como perturbações da memória, de atenção, concentração e da fala, stress e ansiedade;
- Perturbações do sistema hormonal (problemas fetais e de reprodução);
- Desenvolvimento de cancro das fossas nasais, dos seios frontais e pulmões, quando presentes em elevadas concentrações.

Salasar (2007) refere que as tintas à base de solventes orgânicos libertam uma elevada quantidade de VOCs, algo que não sucede para a construção em terra onde na grande maioria dos casos a face da parede interior não é revestida devido a critérios de ordem estética. Este tipo de construção também não padece dos usuais distúrbios electromagnéticos (Gaiola de Faraday), detectados em habitações construídas em betão armado (Radivojevic & Nedic, 2008). Alguns autores referem estudos sobre quebras de fertilidade em animais que viveram durante 3 gerações neste tipo de gaiolas (Day, 2003).

Uma outra vantagem da construção em terra para a qualidade do ar interior tem que ver com a sua capacidade para controlar o nível de humidade relativa (Minke, 2000). Investigações sobre o desempenho de alguns materiais de construção, comprovam que blocos de terra são capazes de absorver 10 vezes mais humidade do ar, do que os tijolos cerâmicos tradicionais (Figura 10.7)

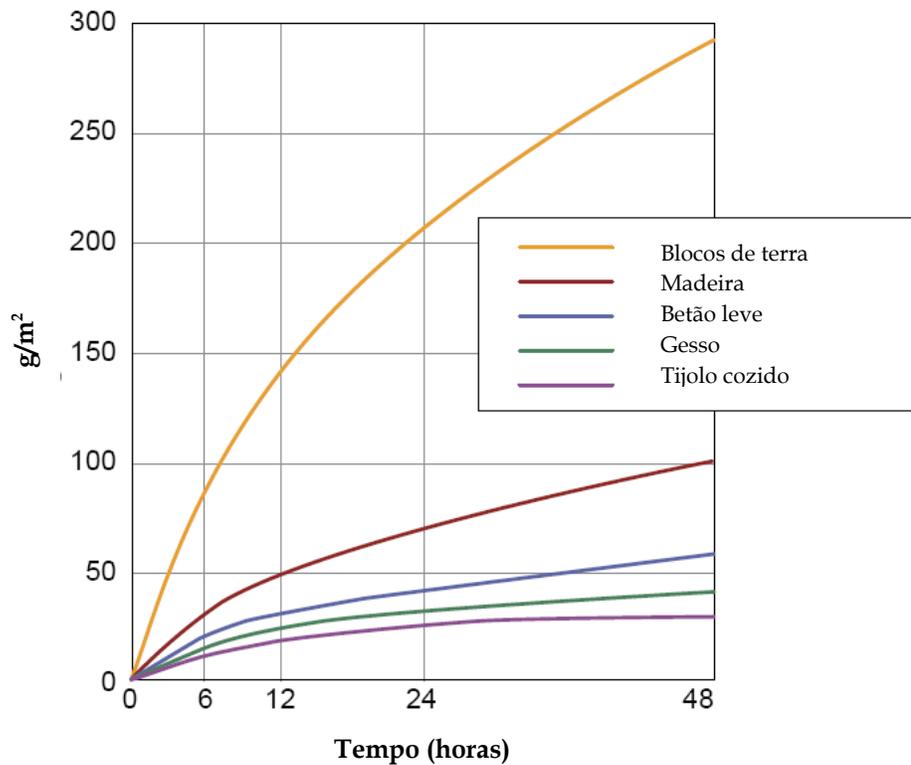


Figura 10.7: Água absorvida por diferentes materiais quando a humidade relativa sobe de 50 para 80% (Minke, 2000)

Segundo alguns autores a higroscopicidade dos materiais de construção, consegue por vezes ser mais efectiva na redução da humidade do ar interior do que a utilização de ventilação (Morton, 2008). Este autor refere um estudo realizado na Grã-Bretanha, onde se constatou que a construção em terra conseguia manter os níveis de humidade interior entre 40 a 60%. Sendo que este intervalo de humidade é o mais indicado para efeitos de saúde humana. De facto, elevados níveis de humidade relativa no interior das habitações acima de 70%, são responsáveis pelo aparecimento de bolores os quais podem desencadear reacções alérgicas (Arundel *et al.*, 2006). Valores de humidade acima de 60% estão associados à presença de ácaros e doenças do foro asmático (Hovieson, 2005). Por outro lado, valores de humidade relativa abaixo de 40%, estão ligados ao síndrome dos “edifícios doentes” típico de ambientes muito secos. Nestes ambientes há lugar a uma secagem da mucosa respiratória, propiciando o aparecimento de doenças do foro respiratório como as amigdalites, faringites ou bronquites. Entende-se por

isso facilmente que as estatísticas sobre saúde pública refiram que das últimas décadas a esta parte se registou um aumento de quase 50% na ocorrência de problemas de saúde do foro respiratório, como a asma. Berge (2009) refere mesmo o caso do Hospital de Feldkirch na Áustria, o qual tem troços de taipa em determinadas zonas, com o único fim de conseguir uma estabilização da humidade do ar.



*Figura 10.8: Parede em taipa, Hospital de Feldkirch, Áustria (Berge, 2009)*



**11**

**Referências**

- ACHENZA, M.; FENU, L. (2006) *On Earth Stabilization with Natural Polymers for Earth Masonry Construction*. Materials and Structures 39, pp. 21-27.
- ALEXANDRA, S. S. S. (2006) *Arquitetura e Construção em Terra no Piauí: Investigação, Caracterização e Análise*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Piauí.
- AMOEDA, ROGÉRIO PAULO (2003) *Ecologia dos Materiais de Construção*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.
- ANTUNES, N.A. (2008) *Caracterização Construtiva de Montes Alentejanos na Região de Évora*. Tese de Mestrado em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- ARUNDEL, A.; STERLING, E.; BIGGIN, J.; STERLING, T. (1986) *Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments*. Environmental Health Perspectives, Vol. 65, pp.351-361.
- ARAÚJO, G. (2005) *Terra sobre Engredado em Portugal*. Editora Argumentum, ISBN: 972-8479-36-0, pp.57-61.
- ATZENI, C., MASSIDDA, L; SANNA, U. (1993) *Technological Properties of Earth-Based Construction Materials Treated With Cement or Acrylic Polymer*. In: Proceedings of 7th international conference on study and conservation of earthen architecture, Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais, Silves, pp 564-568
- ANGER, R.; FONTAINE, L.; HOUBEN, H.; DOAT, P.; DAMME, H.; OLAGNON, C.; JORAND, Y. (2008) *Earth: a Concrete Like any other?* 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.59-65.
- AZEVEDO, J. (2008) *Caracterização da Acção Sísmica*. Em Lopes, M. - Sismos e edifícios. Amadora: Edições Orion. pp.141-187.
- AUROVILLE EARTH INSTITUTE (2008) *Project Moveable House Built In 64 Hours*. <http://www.earth-auroville.com/index.php?nav=menu&pg=projects&id1=18>
- BAHAR, R.; BENAZZOUG, M.; KENAI, S. (2004) *Performance of Compacted Cement-Stabilised Soil*. Cement & Concrete Composites 26, pp.811-820.
- BARBOSA, N.; MATTONE, R.; MESBAH, A. (2002) *Blocos de Concreto de Terra: uma opção interessante para a Sustentabilidade da Construção*. 44<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte - Minas Gerais.
- BARTOLOMÉ, A.; QUIUN, D.; ZEGARRA, L. (2006) *Técnicas para el Reforzamiento Sísmico de Viviendas de Adobe*. Revista Construlink ISSN 1645-5576, pp.18-24.
- BERGE, B. (2009) *The Ecology of Building Materials*. 2<sup>o</sup> Edition, Architectural Press, ISBN 978-1-85617-537-1, Elsevier Science
- BEIRÃO, T. (2005) *Taipa na Arquitectura Contemporânea*. Arquitectura de Terra em Portugal. ISBN: 972-8479-36-0, Editora Argumentum, pp.35-38.
- BRITO, J. (2006) *Características do Solo para a Execução de Taipa*. Parte I. Revista construção Magazine 42-45.
- BRITO, J. (2008) *Ensaio Expedito e de Campo para Selecção de Terra para a Execução de Taipa*. 4<sup>a</sup> parte. *Características do solo para a execução de taipa - 4<sup>a</sup> Parte*. Revista construção Magazine 36-37.
- BRUNTLAND, G. H. (1987). *Report of World Commission on Environment and Development*.
- BUI, Q.B.; MOREL, J.C.; VENKATARAMA, B.V.; GHAYAD, W. (2008) *Durability of Rammed Earth Walls Exposed For 20 Years to Natural Weathering*. Building and Environment 44, pp. 912-919.
- BURROUGHS, S. (2008) *Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization*. Journal of Materials in Civil Engineering, pp.265-273.

- CARVALHO, J.; PINTO, J.; VARUM, H.; JESUS, A.; LOUSADA, J.; MORAIS, J. (2008) *Estudo do Material Terra usado nas Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro*. Terra Brasil 2008, II Congresso de Arquitectura e Construção com Terra no Brasil. S.Luis, Maranhão, Brasil.
- CASTRO, E.; SERAFIM, L.A. (1974) *O Solo-Cal na pavimentação de estradas e aérodromos*; Memória N.º 450. Ministério do Equipamento Social e do Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- CEN (2004) *Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. EN 1998-1: 2004 Comité Européen de Normalisation.
- CEPINHA, E.; FERRÃO, P.; SANTOS, S. (2007) *The Certification as an Enterprise Strategy of the Real Estate Sector: a National Scope Analysis*. International Congress Sustainable Construction, Materials and Practices - Challenge of the Industry for the New Millennium: ISBN 978-1-58603-785-7, pp. 912-917, Portugal SB07, Lisboa
- COMMONER, B. (1971) *The Closing Circle: Nature, Man and Technology*. ISBN 978-0394423500, Random House Inc
- CORREIA, M. (2000) *Le Pisé d'Alentejo, Portugal*. Dissertação de Mestrado sob a orientação de Hubert Guillaud, DPEA-Terre, CRAterre, École d'Architecture de Grenoble, França.
- CORREIA, A. G.C. (1995) *Mecânica dos solos e fundações I-Elementos teóricos*, IST-UTL, Lisboa.
- COSTA, M.J. (2008) *Reabilitação de Coberturas em Madeira. Aplicação ao Centro Histórico de Évora*. Tese de Mestrado, UTL-IST.
- CRISTELO, N.M.C. (2001) *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho.
- CRISTELO, N.M.C.; JALALI, S. (2008) *Estabilização de Solos com Cal*. Edição TecMinho. ISBN: 978-989-95961-1-5, Guimarães, Portugal.
- DAY, C. (2003) *Places of the Soul. Architecture and Environmental Design as a Healing Art*. 2ª Edição, ISBN-13: 978-0750659017, Architectural Press.
- DIAS, A. (2002) *Construção em Tijolo Cerâmico: Das Exigências Normativas do Produto à Prática de Aplicação*. Seminário sobre Paredes de Alvenaria. Ed. P.B.Lourenço & H.Sousa, Porto.
- DEGIRMENCI, N.; BARADAN, B. (2005) *Chemical Resistance of Pozzolanic Plaster for Earthen Walls*. Construction and Building Materials 19, pp.536-542.
- DELGADO, M.C.; GUERRERO, I.C. (2006) *Earth Building in Spain*. Construction and Building Materials 20, pp.679-690.
- DETHIER, J. (1986) *Des Architectures de Terre*. In Edition de Centre Pompidou, Paris
- DOAT, P.; HAYS, A.; HOUBEN, H.; MATUK, S.; VITOUX, F. (1979) *Construire em Terre*. France CRAterre- École d'Architecture de Grenoble.
- Dobson, S. (2000) *Continuity of Tradition: New Earth Building*. University of Technology Sydney (UTS), Earth Bulding Research Forum.
- ECO, C. (2009) *'Brutalista', Ecologica e Moderna: la Casa in Terra Battuta*. [http://www.archinfo.it/brutalista-ecologica-e-moderna-la-casa-in-terra-battuta/0,1254,53\\_ART\\_198286,00.html](http://www.archinfo.it/brutalista-ecologica-e-moderna-la-casa-in-terra-battuta/0,1254,53_ART_198286,00.html)
- EIRES, R.; JALALI, S. (2007) *High Performance Rammed Earth Blocks Using Lime-Metakaolin Mixtures*. V Seminário da arquitetura em Terra em Portugal, pp.89-91, Aveiro, Portugal.
- EIRES, R.; JALALI, S. (2008) *Inovações Científicas de Construção em Terra Crua*. Conferência Internacional - Angola: Ensino, Investigação e Desenvolvimento (EIDAO 08), Braga

- EIRES, R.; JALALI, S. (2008a) *Compressed Earth Block and Mortars with Maetakaolin and Lime Additions*. 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.231-233.
- ESTÊVÃO, J.M.C. ; OLIVEIRA, C.S. (2008) *Stochastic ground motion simulation with geological site effects in damage assessment*. International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone Masonry Housing, Horta, Faial. Proceedings book pp.61-64, CD015
- EUSÉBIO, A.P.J. (2001) *Reabilitação e Melhoramento de Paredes de Terra Crua-Taipa*. Tese de Mestrado em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- EUROSTAT (2007) *Energy Dependency Statistics*.  
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/sdi/indicators/theme6>
- FARIA, O. (2002) *Utilização de Macrófitas Aquáticas na Produção de Adobe: um Estudo no Reservatório de Salto Grande*. Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de S.Paulo.
- FERNANDES, M.; SOUSA, A; DIAS, A. (2004). *Impactes Ambientais e comercio de emissões*. Cerâmica APICER.
- FREIRE, W.J.; RAMIREZ-SARMIENTO, C. (1997) *Argamassa de Cimento e Areia Combinada com Fibras de Bagaço de Cana-de-Açúcar*. Engenharia Agrícola 17, pp.1-8.
- FORUM AMBIENTE (2003). *O mundo Pós Joanesburgo*. Nº 85 First Media Comunicação
- GALHANO, F.; OLIVEIRA, E. (1992) *Arquitetura Tradicional Portuguesa*. D. Quixote, Lisboa.
- GHAVAMI, K.; FILHO, R.; BARBOSA, N. (1999) *Behaviour of Composite Soil Reinforced with Natural Fibres*. Cement and Concrete Composites 21, pp. 39-48.
- GOMES, M.I. (2008) *Construção Sismo-Resistente Em Terra Crua*. Tese de Mestrado em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- GOMES, M.; BRITO, J.; LOPES, M. (2008) *Construção de uma Edificação em Terra Crua Reforçada com Pórticos em Betão Armado*. Teoria e Prática da Engenharia Civil 12, pp.37-47.
- GOODHEW, S.; GRIFFITHS, R. (2005) *Sustainable Earth Walls to Meet the Buildings Regulations*. Energy and Buildings 37, pp.451-459.
- GONZÁLEZ, M.; NAVARRO, J. *Assesment of the Decrease of CO<sub>2</sub> Emissions in the Construction Field through the Selection of Materials: Pratical Case Study of Three Houses of Low Environment Impact*. Building and Environment Vol. 41, 2006, 902-909
- GUETTALA, A.; ABIBSI, A.; HOUARI, H. (2006) *Durability Study of Stabilized Hearth Concrete under Both Laboratory and Climatic Conditions Exposure*. Construction and Building Materials 20, pp.119-127.
- HALL, M. (2007) *Assessing the Environmental Performance of Stabilized Rammed Earth Walls Using a Climatic Simulation Chamber*. Building and Environment 42, pp.139-145.
- HEATHCOTE, K.A. (1995) *Durability of Earthwall Buildings*. Construction and Building Materials 9, pp.185-189.
- HEATHCOTE, K.A. (2002) *An Investigation Into the Erodibility of Earth Wall Units*. PhD Thesis, University of Technology Sydney.
- HEATHCOTE, K.; MOORE, G. (2003) *The UTS Durability Test for Earth Wall Construction*. [www.dab.uts.edu.au/ebrf/research/leipzig-paper.doc](http://www.dab.uts.edu.au/ebrf/research/leipzig-paper.doc)
- HELFRTITZ, H. (1937) *Land without Shade*. Journal of the Royal Central Asian Society 24 (2): 201-16. [http://en.wikipedia.org/wiki/Tower\\_block#Medieval\\_Yemen](http://en.wikipedia.org/wiki/Tower_block#Medieval_Yemen).
- HOUBEN, H.; GUILLAUND, H. (1989) *Traité de Construction en Terre*. Editions Parenthèses, Marseillhe.

- HOUBEN, H.; DOAT, P.; FONTAINE, L.; ANGER, R.; AEDO, W.; OLAGNON, C.; DAMME, H. (2008) *Builders Grains - a new Pedagogical Tool for Earth Architecture Education*. 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.51-57.
- HOUBEN, H., V. RIGASSI; P. GARNIER (1996) *Compressed Earth Blocks - Production Equipment*. Guide Series Technologies n.5, CDI and Craterre-EAG.
- HOWIESON, S. (2005) *Housing and Asthma*. Spon Press, London ISBN 0-415-33646-5.
- HUNTER, W. (2006) *Rammed Earth Construction a Geotechnical Perspective*. University of California December 13.
- ISIK, B.; OZDEMIR, P.; BODUROGLU, H. (1999) Earthquake Aspects of Proposing Gypsum Stabilized Earth (Alker) Construction for Housing in the SouthEast Area of Turkey. Workshop on Recent Earthquakes and Disaster Prevention Management, Ankara.
- IPCC (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 4<sup>th</sup> Assesment report (www.ipcc.ch)
- YETGIN, S.; ÇAVDAR, O.; ÇAVDAR, A. (2008) The Effects of the Fiber Contents on the Mechanic Properties of the Adobes. *Construction and Building Materials* 22, pp.222-227.
- JALALI, S. (1991) *A Study of factors affecting the mechanical behaviour of lime-fly ash mixtures*. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the council for national academic awards for the degree of Ph. D., Coventry Polytechnic.
- JALALI, S.; PIMENTA, C. (1999) *Durable Cement Stabilised Pressed Earth Blocks by Incorporation of Rendering*. *Journal of the British Masonry Society Masonry International* 12, pp. 85-88.
- JAYASINGHE, C.; KAMALADASA, N. (2007) *Compressive Strength of Cement Stabilized Rammed Earth Walls*. *Construction and Building Materials* 21, pp.1971-1976.
- JAQUIM, P.A. (2008) *Analysis of Historic Rammed Earth Construction*. PhD Thesis. Durham Universit, United Kingdom.
- JORGE, F.; FERNANDES, M.; CORREIA, M. (2006) *Arquitectura de Terra em Portugal*. 1<sup>a</sup> Edição, Lisboa, Argumentum ISBN 972-8479-36-0.
- KEABLE, J. (1996) *Rammed Earth Structures. A Code of Practice*. Intermeadiate Technology, London, UK.
- LAVINSKY, E.; SERÓDIO, R.; FERREIRA, E.; CUNHA, J. (1998) *Resistência de Adobes Estabilizados com Diversos Materiais Disponiveis na Região Cacaueira da Bahia*. In Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Piracicaba.
- LOURENÇO, P.I. (2002) *Construções em Terra*. Tese de Mestrado em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- LOURENÇO, P. (2005) *As Estruturas de Terra e os Sismos*. In *A Arquitectura de Terra em Portugal*, pp.189-193, Editora Argumentum.
- MANIATIDIS, V.; WALKER, P. (2003) *A Review of Rammed Earth Construcion*. University of Bath.
- MAGALHÃES, A.C.; VEIGA, M.R. (2007) *Physical and Mechanical Characterization of Ancient Mortars. Application to the evaluation of the state of conservation*. *Cement and Concrete Research* (submetido) <http://cathedral.lnec.pt/portugues/publicacoes.html>
- MAGALHÃES, A.C.; MORAGUES, A.;VEIGA, M.R. (2004) *Application of some Methods on Evaluation of Porous Systems of Wall Renderings*. VII Congreso Internacional de Rehabilitación del patrimonio y edificacion, Lanzarote, Proc. 0803/11/14824
- MARQUES, J.C.M. (2002) *Paredes de Taipa*. Monografias- Construlink
- MARTIN, M. (1998) *L'Adobeton une Technologie Approprie pou un Habitat Economique Ameliore"*, Sud Sciences and Technologies N.1.

- MATEUS, L.P.M. (2006) *Caracterização de Revestimentos usados em Construções de Taipa no Barlavento Algarvio*. Tese de Mestrado em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- MENDES, M. (2006) *Diário de Campo - Curso de Construção com Terra e de Formação de Formadores*, desenvolvido em Mumemo, Moçambique, <http://www.mumemo.blogspot.com>.
- MEADOWS, D.L.; MEADOWS, D.L.; BEHRENE, J.R.W. (1972). *The Limit to Growth*, MIT Press, 1972.
- MILLOGO, Y.; HAJJAJI, M.; OUEDRAOGO, R. (2008) *Microstructure and Physical Properties of Lime-Clayey Adobe Bricks*. *Construction and Building Materials* 22, pp. 2386-2392.
- MINKE, G. (2000) *Earth Construction Handbook*. The Building Material Earth in the Modern Architecture. WIT Press, Southampton, U.K.
- MINKE, G. (2006) *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel- Berlin-Boston.
- MINKE, G. (2007) *Building with Earth – 30 Years of Research and Development at the University of Kassel*. T1A CESB 07 Conference, pp.89-98, Prague.
- MICHEL, J. (1976) *Etude sur la Stabilisation et la Compression des Terres. Pour Leur Utilisation dans la Construction*. Annales de l'Institut Technique de Batiment et des Travaux Publics. Série Matériaux, pp.22-35.
- MIDDLETON, G.F. (1992) *Bulletin 5. Earth Wall Construction*. Fourth Edition, CSIRO Division of Building, Construction and Engineering, North Ryde, Australia.
- MOREL, J.C.; MESBAH, A.; OGGERO, M.; WALKER, P. (2001) *Building Houses with Local Materials: Means to Drastically Reduce the Environmental Impact of Construction*. *Building and Environment* 36, pp.1119-1126.
- MOREL, J.C.; PKA, A.; WALKER, P. (2007) *Compressive Strength Testing of Compressed Earth Blocks*. *Construction and Building Materials* 21, pp.303-309.
- MORTON, T.; STEVENSON, F.; TAYLOR, B.; SMITH, C. (2005) *Low Cost Earth Brick Construction: Monitoring and Evaluation*. Arc. Architects. ISBN 0-9550580-0-7.
- MORTON, T. (2008) *Earth Masonry – Design and Construction Guidelines*. ISBN 978-1-86081-978-0. HIS BRE Press
- MOTTA, M (1997) *Construções Rurais em Alvenaria de Terra Crua no Baixo Alentejo*. Tese de Mestrado, UTL-IST.
- MUKERJI, K.; CRATERre (1988) *Soil Block Presses*. Publication of Deutsches Zentrum fr Entwicklungstechnologien - GATE, a Division of the Deutsche Gesellschaft fr Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 38p..
- NEUMANN, J.V.; BERNALES, J.B.; BLONDET, M. (1984) *Resistência Sísmica de la Mamposteria de Adobe*. Pontificia Universidad Católica del Peru, 19p.
- NGOWI, A. (1997) *Improving the Traditional Earth Construction: a Case Study in Botswana*. *Construction and Building Materials* Vol.11, pp.1-7.
- NZS 4297 (1998) *New Zealand Standards, Engineering Design of Earth Buildings*. New Zealand.
- NZS 4298 (1998a) *New Zealand Standards, Material and Workmanship for Earth Buildings*. New Zealand.
- OCDE (2003) *Environmental Sustainable Building – Challenges and Policies*. 194p. Paris, França.
- OLIVEIRA, C. S. (1977) *Sismologia, Sismicidade e Risco Sísmico. Aplicações em Portugal*. Relatório. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- OGUNYE, F.O.; BOUSSABAIN, H. (2002) *Diagnosis of Assessment Methods for Weatherability of Stabilized Compressed Soil Blocks*. *Construction and Building Materials* 16, pp.163-172.

- OLOTUAH, A.O. (2002) *Recourse to Earth for Low-Cost Housing in Nigeria*. Construction and Building Materials 37, pp.123-129.
- PNAEE (2008) *Plano Nacional para a Eficiência Energética-Portugal Eficiência 2015*. Ministério da Economia e da Inovação.
- PARREIRA, D.J. (2007) *Análise Sísmica de uma Construção em Taipa*. Tese de Mestrado em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- PARRA-SALDIVAR, M.L.; BATTY, W. (2006) *Thermal Behaviour of Adobe Constructions*. Building and Environment 41, pp. 1892-1904.
- PERERA, A.; JAYASINGHE, C. (2003) *Strength Characteristics and Structural Design Methods for Compressed Earth Block Walls*. Masonry International 16, pp.34-38.
- PEREIRA, O. A. (1970) *Estabilização de Solos*. Curso de especialização 108, LNEC, Lisboa
- PINHO, F.F.S (2001) *Paredes de Edifícios Antigos em Portugal*. Edição LNEC, Conservação e Reabilitação.
- POLLOCK, S. (1999) *Ancient Mesopotamia*, Cambridge University Press.
- QUINTINO, G. (2005) *Blocos de Terra Compactada. Arquitectura de Terra em Portugal*. Editora Argumentum ISBN: 972-8479-36-0, pp.53-56.
- RAEL, R. (1971) *Earth Architecture*. ISBN 978-1-56898-767-5, Princeton Architectural Press, New York
- RADIOJEVIC, A.; NEDIC, M. (2008) *Environmental Evaluation of Building Materials – Example of Two Residential Buildings in Belgrade*. Facta Universitatis, Architecture and Civil Engineering, Vol. 6, nº1, pp.97-111.
- RIBEIRO, O. (1969) *Geografia e Civilização*. Temas Portugueses, Coleção Espaço e Sociedade, Livros Horizonte, Lisboa, Portugal.
- RSAAEP (1983) *Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes*. Dec.Lei 235/83 de 31 de Maio.
- RODRIGUES, M. (1993) *Revestimentos de Impermeabilização de Paredes à Base de Ligantes Minerais*. Dissertação de Mestrado, IST-UTL.
- RODRIGUES, M. P. (2005) *Revestimentos de Paredes em Terra*. In *A Arquitectura de Terra em Portugal* ISBN: 972-8479-36-0, pp.68-73, Editora Argumentum.
- ROGERS, C.D.F.; SMALLEY, I.J, (1995) *The Adobe Reaction and the Use of Loess Mud in Construction*. Construction and Building Materials 40, pp. 137-138.
- SALMA, E.; NEGREIROS, A.; TOGNON, M. (2005) *Patologias da Arquitectura em Terra: Avaliação Pós-10 anos de uso de uma Residência Construída em Solo-Cimento Monolítico*. IV Seminário Ibero-Americano da Construção em Terra, pp.275-278.
- SALASAR, C. (2007) *Estudo Sobre Emissão de Compostos Orgânicos Voláteis COVS em Tintas Imobiliárias à Base de Solvente e Água*. Dissertação de Mestrado em Química, Universidade Estadual de Londrina.
- SILVA, V.C.; COSTA, J.P. (2006) *Terra Projectada : um Novo Método de Reabilitação de Construções em Taipa*. Editora Argumentum ISBN: 972-8479-36-0, pp. 59-61.
- SHITTU, T. (2008) *Earth Building Norms and Regulation: a Review of Nigerian Building Codes*. 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.41-47.
- SHITTU, T. (2008a) *Earth Construction in Nigeria: Challenges and Prospects*. 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.41-47.
- SOARES, J.; TOMAZETTI, R.; PINHEIRO, R. (2004) *Habitação em Paredes Monolíticas de Solo-Cimento*. Teoria e Prática da Engenharia Civil 5, pp.51-57.

- SCHROEDER, H.; VOLHARD, F.; ROHLEN, U.; ZIEGERT, C. (2008) *The "Lehmbau Regeln" in 2008 – a Review after 10 years of Use in Practice*. 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.13-21.
- SCHROEDER, H.; ROHLEN, U.; JORCHEL, S. (2008a) *Education and Vocational Training in Building with Earth in Germany*. 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.193-197.
- SHUKLA, A.; TIWARI, G.; SODHA, M.S. (2008) *Embodied Energy Analysis of Adobe House*. Renewable Energy 34, pp. 755-761.
- STANDARDS AUSTRALIA (2002) *The Australian Building Handbook*. Standards Australia.
- STERN, N. (2006) *Stern Review on Economics of Climate Change*. Cambridge University Press
- TIBBETS, J. (2001) *Emphasis on Rammed Earth Walls*. Interaméricas Adobe Builder, 9, pp.4-33.
- THOMARK, C. (2006) *The effect of Material Choice on the Total Energy Need and Recycling Potential of a Building*. Building and Environment Vol. 41, 2006, 1019-1026
- UNFCCC (1997). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations Convention on Climate Change, FCC/CP/L.7/Add1, Kyoto
- VEIGA, M.; JÚNIOR, J. (2000) *Definição de um Método de Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade para Amostras de Argamassas Irregulares e Friáveis*. LNEC.
- WALKER, P. (2000) *Review and Experimental Comparison of Erosion Tests for Earth Blocks*. In: Terra 2000, Proceedings of the 8<sup>th</sup> international Conference on the study and conservation of earthen architecture. Icomos, Torquay, UK, pp.176-181.
- WILSON, Q. (2008) *Manufacturing Sun-Cured Adobe Bricks in the USA*. In 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.99-103.
- WILLIMS-ELLIS, C.; EASTWICK-FIELD, E. (1950) *Building in Cobpise, and Stabilized Earth*. London, Country Life, p.138.
- WORLD WATCH INSTITUTE (2009) *State of the World 2009*. ISBN: 978-0-393-33418-0
- WORLD ENERGY OUTLOOK (2008) <http://www.iea.org/weo/2008.asp>. ISBN: 978-92-64-04560-6

# 12

## **Outra Bibliografia**

- ATZENI, C.; PIA, G.; SANNA, U.; SPANU, N. (2008) Surface Wear Resistance of Chemically or Thermally Stabilized Earth-Based Materials. *Materials and Structures* 41, pp. 751-758.
- AZEREDO, G.; MOREL, J.C.; LAMARQUE, C.H. (2008) *Applicability of Rheometers to Characterizing Earth Mortar Behavior. Part I: Experimental Device and Validation*. *Materials and Structures* 41, pp. 1465-1472.
- BINICI, H.; AKSOGAN, H.; SHAH, T. (2005) *Investigation of Fibre Reinforced Mud Brick as a Building Material*. *Construction and Building Materials* 19, pp.313-318.
- BOUHICHA, M.; AOUISSI, F.; KENAI, S. (2005) *Performance of Composite Soil Reinforced with Barely Straw*. *Cement and Concrete Composites* 27, pp.617-621.
- CALABRIA, J.; VASCONCELOS, W.; BOCACCINI, A. (2008) *Microstructure and Chemical Degradation of Adobe and Clay Bricks*. *Ceramics International* 25, pp.665-671.
- CORREA, A.; TEIXEIRA, V.; LOPES, S.; OLIVEIRA, M. (2006) *Avaliação das Propriedades Físicas e Mecânicas do Adobe (Tijolos de Terra Crua)*. *Lavras* 30, pp. 503-515.
- DELGADO, M.C.; GUERRERO, I.C. (2007) *The selection of Soils for Unstabilised Earth Building: A Normative Review*. *Construction and Building Materials* 21, pp.237-251.
- HALL, M.; DJERBIB, Y. (2004) *Rammed Earth Sample Production: Context, Recommendations And Consistency*. *Construction and Building Materials* 18, pp.281-286.
- HALL, M.; DJERBIB, Y. (2004) *Moisture Ingress in Rammed Earth: Part 1 – The Effect of Soil Particle-Size Distribution on the Rate of Capillary Suction*. *Construction and Building Materials* 18, pp.269-280.
- HALL, M.; DJERBIB, Y. (2006) *Moisture Ingress in Rammed Earth: Part 2 – The Effect of soil Particle-Size Distribution on the Absorption of Static Pressure-Driven Water*. *Construction and Building Materials* 20, pp.374-383.
- HALL, M.; DJERBIB, Y. (2006) *Moisture Ingress in Rammed Earth: Part 3 – Sorptivity, Surface Receptiveness and Surface Inflow Velocity*. *Construction and Building Materials* 20, pp.384-395.
- HARRIS, D. J. (1999) *A Quantitative Approach to the Assessment of the Environmental Impact of Building Materials*. *Building and Environment* 34, pp.751-758
- ISIK, B.; TULBENTCI, T. (2008) *Sustainable Housing in Island Conditions using Alker-Gypsum-Stabilized Earth: A Case Study from Northern Cyprus*. *Building and Environment* 43, pp.1426-432.
- KERALI, A.; (2000) *Destructive Effects of Moisture on the Long-Term Durability of Stabilized Soil Blocks*. University of Warwick.
- LITTLE, B.; MORTON, T. (2001) *Building with Earth in Scotland. Innovative Design and Sustainability*. Scottish Executive Central Research Unit, Edimburgh.
- LAWRENCE, M.; HEATH, A.; WALKER, P. (2008) *Mortars for Thin Unfired Clay Masonry Walls*. 5<sup>th</sup> International Conference on Building with Earth - LEHM 2008, Weimar, Germany, pp.67-74.
- MAGAIA, S.J.; GOHNERT, M. (2003) *Cúpulas de Terra em Habitação Alternativa*. *Revista Internacional Construlink*, n° 4, Vol.1, pp.1-9.
- MARGALHA, M.G. (2008) *Conservação e Recuperação de Construções em Taipa*. Acção de Formação, Taliscas, Odemira.
- MATEUS, R.F.M. (2004) *Novas Tecnologias Construtivas com Vista à Sustentabilidade da Construção*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal
- MÉDOUT-MARÉRE, V.; BELARBI, H.; THOMAS, P.; MORATO, F.; GIUNTI, J.: DOUILLARD (1998) *Thermodynamic Analysis of the Immersion of a Swelling Clay*. *Journal of Colloid and Interface Science* 202, pp. 139-148.

- MILANEZ, A. (1958) *Casa de Terra, as Técnicas de Estabilização do Solo ao Serviço do Homem do Campo*. São Paulo, SESP.
- MINKE, G. (2001) *Construction Manual for Earthquake-Resistant Houses Built of Earth*. Gate Basin GTZ GmbH.
- NOTHER, R. (2000) *A Reparação de Edificações com Paredes de Terra*. Institute of Historic Building Conservation.
- ORTEGA, A. (1983) *Materiaux et Techniques de Construction*. Pontificia Universidad Catolica del Peru, p.43.
- PISANI, M. (2007) *Restauração das Paredes de Taipa Paulistas*. Ensaio 1, pp.2-20.
- PKLA, A.; MESBAH, A.; RIGASSI, V.; MOREL, J.C. (2003) *Comparaison de Méthodes d'Essais de Mesures des Caractéristiques Mécaniques des Mortiers de Terre*. Materials and Structures 36, pp. 108-117.
- RODRIGUES, J. (1980) *A Casa de Moradia no Brasil Antigo*. Revista do Serviço de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, São Paulo, pp.159-197.
- SILVA, F. (2007) *Análise da Sustentabilidade no Processo de Produção de Moradias Utilizando Adobe e Bloco Cerâmico*. Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de S. Paulo.
- SOLÁ, G.B. (2002) *Mejora De La Tierra Estabilizada en el Desarrollo de una Arquitectura Sostenible Hacia El Siglo XXI*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, UPC, Espana.
- SUKRU, Y.; CAVDAR, O.; CAVDAR, A. (2008) *The Effects of the Fiber Contents on the Mechanic Properties of the Adobes*. Construction and Building Materials 22, pp.222-227.
- TAYLOR, P.; LUTHER, M.B. (2004) *Evaluating Rammed Earth Walls: a Case Study*. Construction and Building Materials 76, pp.79-84.
- TAYLOR, P.; FULLER, R.J.; LUTHER, M.B. (2008) *Energy Use and Thermal Comfort in a Rammed Earth Office Building*. Construction and Building Materials 40, pp.793-800.



# 13

## Índice de Figuras

**Capítulo 1:**

Figura 1.1: Templo de Ramsés, Gourná, Egipto	10
Figura 1.2: Utilização de taipa na Grande Muralha da China	11
Figura 1.3: Templo de Horyuji, Japão	11
Figura 1.4: Manuscrito com pormenores da construção em taipa	12
Figura 1.5: Pirâmide do Sol de Teotihuacan, México	13
Figura 1.6: Edificações em terra, Taos, Novo México	13
Figura 1.7: Edifícios em adobe, Shibam, Iémen	14
Figura 1.8: Castelo de Paderne, Algarve	15
Figura 1.9: Distribuição geográfica das construções tradicionais Portuguesas em terra	16
Figura 1.10: Mapa-mundo - Zonas com elevada densidade de construção em terra	17
Figura 1.11: Mapa-mundo - Precipitação e temperaturas médias anuais	18
Figura 1.12: Parede de Trombe em taipa construída no âmbito do programa Design Build Bluff	20
Figura 1.13: Construção de banco de jardim	21
Figura 1.14: Estrutura para realização de eventos com colunas de terra	22
Figura 1.15: Construção em terra em Portugal	23

**Capítulo 2:**

Figura 2.1: Terra monolítica de terra projectada	30
Figura 2.2: Paredes de terra sobre engradado de madeira	32
Figura 2.3: Edifício de 6 andares construído em taipa	33
Figura 2.4: Parede exterior em taipa reforçada com tijolo cerâmico	34
Figura 2.5: Construção em taipa tradicional, Moçambique	35
Figura 2.6: Taipa tradicional	36
Figura 2.7: Pilões ou maços utilizados na taipa tradicional	37
Figura 2.8: Construção em taipa com cofragens metálicas	38
Figura 2.9: Nk'Mip Desert Cultural Centre, Canadá	39
Figura 2.10: Compactação de terra por meios mecânicos	40
Figura 2.11: Abertura de roços para passagem de rede de águas	41
Figura 2.12: Produção manual de adobes	42
Figura 2.13: Alvenaria de adobe	44
Figura 2.14: Produção mecânica de adobes	45
Figura 2.15: Construção de parede em "Adobeton"	46
Figura 2.16: Edifício de adobe moldado in-situ	47
Figura 2.17: Construção de alvenarias com recurso a BTC, Alentejo	48
Figura 2.18: Casa móvel construída em 64 horas	49
Figura 2.19: Construção em BTC com estrutura incorporada	49
Figura 2.20: BTC com encaixes tipo macho/fêmea	50

Figura 2.21: Execução de BTC com a prensa Cinva-ram	51
Figura 2.22: BTC feito em prensa mecânica	52
Figura 2.23: Prensa hidráulica para fabrico de BTC	53
<b>Capítulo 3:</b>	
Figura 3.1: Ensaio de compactação Proctor pesado	61
Figura 3.2: Preparação de um provete de 45×30mm para ensaio à compressão simples	63
Figura 3.3: Metodologia para aferir a aptidão de um solo para ser estabilizado	69
Figura 3.4: Formação de material cimentício numa mistura solo-cal	73
Figura 3.5: Microestrutura de blocos de adobe com cal	77
Figura 3.6: Solo com cimento: a) alto teor; b) baixo teor	78
<b>Capítulo 4:</b>	
Figura 4.1: Influência da estabilização na resistência mecânica	83
Figura 4.2: Resistência à compressão	85
Figura 4.3: Resistência à compressão - Procedimento do RILEM	86
Figura 4.4: Avaliação da resistência à compressão em troço de taipa	88
Figura 4.5: Avaliação da resistência ao impacto	89
Figura 4.6: Influência da resistência à compressão no módulo de elasticidade de solo estabilizado com diferentes teores de cimento	90
Figura 4.7: Cidadela de Arg-é-Bam, Irão	91
Figura 4.8: Zonas de risco sísmico elevado e muito elevado	92
Figura 4.9: Zonas de elevada densidade de construção em terra	92
Figura 4.10: Zonamento sísmico proposto no EC8	93
Figura 4.11: Construção em adobe com reforço anti-sismico	94
Figura 4.12: Reforço da ligação viga/parede através de chumbadouros	95
Figura 4.13: Modelo estrutural correspondente à medida de reforço 5	96
Figura 4.14: Construção corrente em taipa reforçada com tirantes de aço correspondente à medida de reforço 3	97
Figura 4.15: Análise do comportamento à humidade de 4 paredes de taipa	99
Figura 4.16: Índice de isolamento aos sons aéreos	102
<b>Capítulo 5:</b>	
Figura 5.1: Casa com parede de taipa com 150 anos no Sul de França	106
Figura 5.2: Casa com paredes de solo-cimento compactado após 1 ano de uso	107
Figura 5.3: Troços de paredes de taipa expostos durante 20 anos aos agentes atmosféricos	109
Figura 5.4: Ensaio acelerado de erosão Bulletin 5	113
Figura 5.5: Ensaio acelerado de erosão UTS	114

Figura 5.6: Ensaio acelerado de erosão	115
<b>Capítulo 6:</b>	
Figura 6. 1: Alvenaria de taipa	118
Figura 6. 2: Alvenaria de taipa revestida por caiação	119
Figura 6. 3: Ensaio de resistência à compressão de revestimentos antigos	122
Figura 6.4: Resistência à compressão de revestimentos antigos - Correlação de ensaios <i>in situ</i> com ensaio em laboratório	123
Figura 6.5: Absorção de água por capilaridade em revestimentos antigos	125
<b>Capítulo 7:</b>	
Figura 7.1: Utilização de tijolos de barro no confinamento de vão	131
Figura 7.2: Desligamento de panos de parede por rotação da fundação	131
Figura 7.3: Patologias estruturais em construções de terra	132
Figura 7.4: Erosão da base de uma parede por acção da água	134
<b>Capítulo 8:</b>	
Figura 8.1: Reabilitação de fundações	138
Figura 8.2: Preenchimento de fissuras em paredes de terra	139
Figura 8.3: Reabilitação de alvenaria com projecção de terra a alta pressão	140
Figura 8.4: Reabilitação de asnas de madeira	141
Figura 8.5: Lintel de reforço em betão	142
Figura 8.6: Reforço com cabos de aço	142
Figura 8.7: Reforço estrutural com perfis de aço	143
Figura 8.8: Reconstrução de parede de taipa com subida do lintel de fundação	144
Figura 8.9: Vala para drenagem de águas pluviais e freáticas	145
<b>Capítulo 10</b>	
Figura 10.1: Central termo-eléctrica do Carregado	157
Figura 10.2: Evolução temporal da dependência energética portuguesa	158
Figura 10.3: Intensidade energética de Portugal e da média Europeia por unidade de PIB	158
Figura 10.4: Origem do consumo de energia em Portugal	159
Figura 10.5: Carbono incorporado em materiais para alvenarias	161
Figura 10.6: Consumo energético dos principais materiais	163
Figura 10.7: Água absorvida por diferentes materiais quando a humidade relativa sobre de 50 para 80%	166
Figura 10.8: Parede em taipa, Hospital de Feldkirch, Áustria	167

# 14

## Índice de Tabelas

**Capítulo 2:**

Tabela 2.1: Características de pilões para taipa	37
--	----

**Capítulo 3:**

Tabela 3.1: Massa volúmica seca após compactação	63
Tabela 3.2: Limites de consistência para solos utilizados na construção em terra	64
Tabela 3.3: Classificação da plasticidade de um solo	64
Tabela 3.4: Grau de actividade de argilas	64
Tabela 3.5: Classificação da retração de um solo	65
Tabela 3.6: Características de solos para a construção em terra	65
Tabela 3.7: Análise granulométrica	66
Tabela 3.8: Limites de consistência	66
Tabela 3.9: Ensaio de compactação Proctor	67

**Capítulo 4:**

Tabela 4.1: Resistência mecânica aos 21 dias para diferentes processos de estabilização Susceptibilidade à fendilhação	82
Tabela 4.2: Resistência à compressão não confinada	84
Tabela 4.3: Resistência mecânica das variantes da construção em terra	85
Tabela 4.4: Resistência à compressão de troço de parede de taipa	87
Tabela 4.5: Condutividade térmica para as variantes da construção em terra	100
Tabela 4.6: Índice de redução sonoro	102

**Capítulo 5:**

Tabela 5.1: Rácio ( $R_w/R_s$ ) em paredes de taipa	110
Tabela 5.2: Avaliação da durabilidade das construções em terra	111
Tabela 5.3: Ensaio de erosão acelerada com jacto de água	112

**Capítulo 6:**

Tabela 6.1: Comparação da resistência à compressão do revestimento e do suporte em taipa	123
Tabela 6.2: Coeficientes de capilaridade por contacto	126

**Capítulo 7:**

Tabela 7.1: Anomalias em elementos estruturais	133
Tabela 7.2: Lista de verificações periódicas	135

**Capítulo 10:**

Tabela 10.1: Geração de resíduos durante a extracção de alguns metais	154
Tabela 10.2: Energia gasta em transporte	160

