

2 Revisão bibliográfica

2.1 Histórico do material terra

Os arqueólogos distinguem três fases principais na evolução cultural da humanidade, conhecidas respectivamente como Idade da Pedra, do Bronze e do Ferro, em função da utilização destes materiais em ferramentas e armas.

Inicialmente, o Homem viveu uma vida nômade em que pequenos grupos se deslocavam em busca de alimentos, caçando animais de pequeno e médio porte, recolhendo frutos silvestres, raízes e insetos e pescando junto aos rios e mares. Por volta do final da Idade da Pedra, ocorreu uma alteração significativa no modo de vida social, uma vez que o homem descobriu a agricultura e passou a fixar local de habitação. Os homens começaram, então, a construir locais de residência habitual utilizando galhos e pele de animais.

Em seguida, foi alcançado um desenvolvimento social e econômico suficiente para permitir a construção de cidades e vilas, onde uma parte da população se ocupava do comércio, indústria e atividades profissionais.

Sabe-se que os primeiros materiais de construção foram aqueles oferecidos pela natureza, como pedra, palha, galhos, madeira e, sem dúvida, a terra. Segundo Lourenço (1999), em diversos locais do atual oriente médio, a necessidade de matérias-primas para construção combinada com a abundância de argila, o clima quente e seco e a falta de madeira e pedra para construção conduziram ao desenvolvimento dos blocos de terra. Os blocos podiam ser facilmente moldados, eram mais leves do que a pedra e formavam uma parede durável e resistente ao fogo. Ainda hoje são encontradas obras erguidas pelos romanos quando ainda não havia conhecimento dos materiais industrializados (BARBOSA, 2005).

Algumas civilizações, como egípcios e persas, construíram cidades inteiras utilizando blocos secos ao sol (adobe). No Egito, desde aproximadamente 5000 a.C. até a ocupação romana (50 d.C.), o material mais utilizado na construção de habitações era o adobe, geralmente de lama do rio Nilo. A sua forma de produção está documentada em uma pintura do túmulo de Rekhmara (aproximadamente. 1500 a.C.) (Figura 2.1).



Figura 2.1: Produção de blocos no Egito, tal como representada numa pintura do túmulo de Rekhmara em Thebes (LOURENÇO, 1999).

A lama do Nilo pura retrai 30% no processo de secagem, mas a adição de palha e areia à pasta previne a formação de fissuras nos blocos.

A cidadela de Bam, localizada em Kerman, Irã é um símbolo da arquitetura com adobe (Figura 2.2). Construída mais de 2500 anos atrás, a cidade fortificada foi habitada até o final do século XIX por cerca de 10.000 pessoas. "Esta cidade de adobe reforçado com palha de trigo é agora designada como patrimônio mundial pela UNESCO e incluiu uma fortaleza com mais de sessenta torres (...) e centenas de casas", segundo Manzano-Ramirez *et al.* (2007). Infelizmente, em 2003, a cidadela foi quase completamente destruída por um terremoto e, então, ela foi inscrita na Lista de Patrimônio Mundial em Perigo (UNESCO ref.1208).

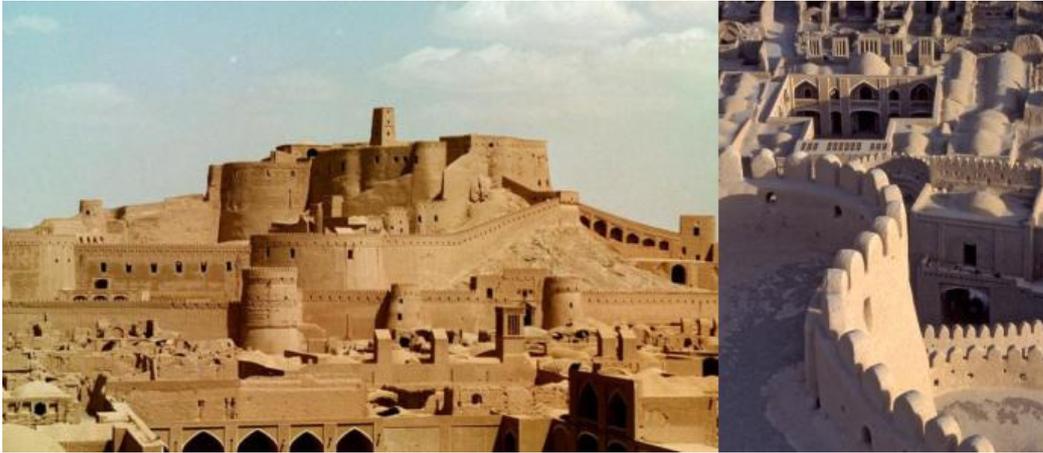


Figura 2.2: Cidadela de Bam, Irã (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: M.Gray).

Na Figura 2.3 observam-se as ruínas de Tchogha Zanbil, também no Irã. Fundada em 1250 a.C., a cidade permaneceu inacabada após ter sido invadida em 640 a.C., o que foi deduzido em função dos milhares de blocos não utilizados deixados no local (UNESCO ref.113). A cidade era a capital religiosa do reino elamita, uma das primeiras civilizações de que se tem registro no extremo oeste e sudeste do que é hoje o Irã. A cidade foi inscrita na Lista de Patrimônio da Humanidade em 1979.

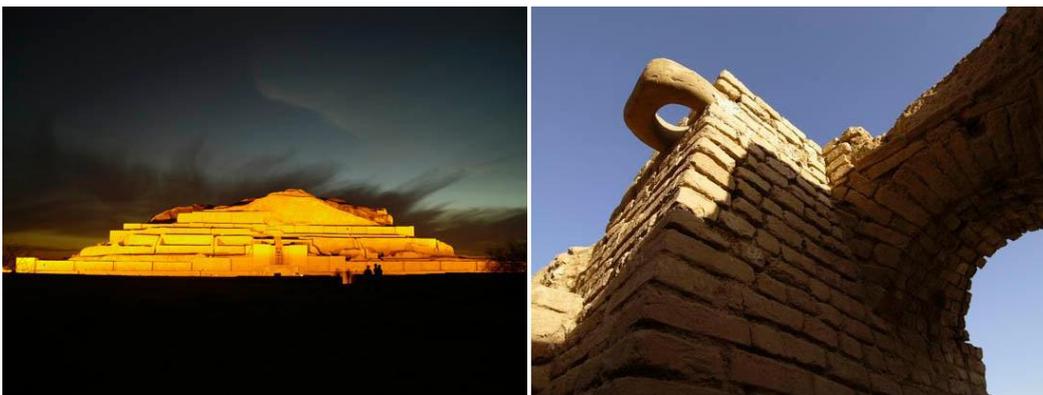


Figura 2.3: Ruínas de Tchogha Zanbil, Irã (fonte: World Heritage Collection).

Na província de Kerman, ainda no Irã, cerca de 240 km a noroeste de Teerã, dentro da muralha da cidade velha de Soltaniyeh, está localizada a Cúpula da Soltaniyeh (Mausoléu de Ilkhan Oljaytu), a maior cúpula de blocos do mundo (Figura 2.4). A mesquita é famosa por sua arquitetura e design de interiores. Sua construção foi iniciada em 1302 e levou quase 10 anos. É a mais antiga cúpula de camada dupla e a terceira maior cúpula no mundo. A construção octogonal atinge 28,5 m de altura e cada lado mede quase 17 m. Ela é azul e a sua parte interior é decorada com blocos coloridos e reboco. Nas laterais do teto, estão inscritos

alguns versículos do Alcorão. Estudiosos descreveram o edifício como “antecipação do Taj Mahal”. Infelizmente, boa parte da decoração exterior se perdeu, mas o interior preserva ainda soberbos mosaicos, faianças (forma de cerâmica branca) e murais (UNESCO ref.1188).



Figura 2.4: Cúpula de Soltaniyeh, Kerman, Irã (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: B. Sedighi).

O adobe também foi empregado na cidade de Shibam, no Iêmen do Sul. Permanecendo juntos em uma pequena área, grupos de edifícios de cinco a oito andares, alguns deles ligados por corredores ao ar livre, fizeram o local ficar conhecido como a "Manhattan do deserto" (Figura 2.5).

"Shibam remonta ao século III. No entanto, os edifícios que permanecem até hoje são na maior parte do século XVI (...). Os blocos se tornam progressivamente menores nos andares superiores, o que significa que as construções tornam-se progressivamente mais finas, formando um trapézio. As paredes são mais finas nos andares superiores para reduzir a pressão sobre os andares inferiores, tornando a construção sólida e estável (...). As residências de terra mantêm-se frias na parte interior apesar do calor do lado de fora." (UNESCO ref.192).



Figura 2.5: Shibam, Iêmen – “A Manhattan do deserto” (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: J. Gao).

Entretanto, a cidade de Shibam foi fortemente afetada por inundações em 2008. As fundações de muitos dos edifícios foram comprometidas pelas águas da enchente. A cidade também foi alvo de um ataque da Al-Qaeda em 2009. Shibam também aparece na lista do Patrimônio Mundial, da UNESCO.

No atual Uzbequistão, ainda restam as muralhas feitas de blocos de terra, de aproximadamente 10 m de altura, que protegem a cidade de Itchan Kala (UNESCO ref.543). A cidade é a última parada das caravanas antes de atravessarem o deserto em direção ao Irã (Figura 2.6).



Figura 2.6: Itchan Kala, Uzbequistão (fonte: World Heritage Collection).

No sul do Paquistão, durante escavações arqueológicas ocorridas em 1922, foram encontradas as ruínas da grande cidade de Moenjodaro, fundada por volta de 2500 a.C., um dos berços da civilização do Vale do Indo, considerada uma das quatro maiores civilizações antigas (Figura 2.7).



Figura 2.7: Ruínas de Moenjodaro, Paquistão (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: J. Han).

Na Índia, blocos eram usados na arquitetura de templos Hindus, normalmente em conjunção com pedras, como a mesquita de Bagerhat localizada no ponto de encontro dos rios Ganges e Brahmaputra e fundada pelo general turco Ulugh Khan Jahan, no século XV (Figura 2.8). A mesquita é um dos monumentos inscritos entre os Patrimônios Mundiais da UNESCO (UNESCO ref.321).



Figura 2.8: Mesquita de Bagerhat, Bangladesh (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: M. Hasan).

No entanto, somente durante o império Romano (500 a.C. a 300 d.C.) a produção de blocos de terra se expandiu a todas as civilizações. Isso ocorreu devido a variedade e facilidade de obter a matéria-prima e a vontade de marcar o domínio e de homogeneizar a arquitetura, a indústria de construção, a sociedade e a economia. Os edifícios romanos, devido ao clima da região, eram construídos essencialmente com blocos secos ao sol assentados sobre juntas de barro. As faces exteriores eram revestidas para melhorar o aspecto e também para dar uma melhor proteção contra a chuva (Lourenço, 1999).

A cidade velha de Sana'a, no Iêmen, situada em um vale da montanha a uma altitude de 2.200 m, foi habitada por mais de 2500 anos (Figura 2.9).



Figura 2.9: Cidade de Sana'a, Iêmen (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: F. Bandarin).

Nos séculos VII e VIII, a cidade de Sana'a se tornou um grande centro de propagação do Islã. As 103 mesquitas, 14 banhos turcos e mais de 6.000 casas formam um gigantesco patrimônio, todos construídos antes do século XI (UNESCO ref.385). Os edifícios de diversos andares aumentam a beleza do lugar e todo o conjunto está inserido na lista de Patrimônio Mundial da UNESCO.

Outra localização no Iêmen que merece destaque é a vila histórica de Zabid. Capital do país entre os séculos XIII e XV, a cidade desempenhou um papel importante no mundo árabe e muçulmano por muitos séculos, devido à sua posição como centro da educação islâmica (Figura 2.10). No entanto, hoje a cidade está em declínio e em mau estado de conservação. Uma missão de peritos constatou uma grave deterioração do patrimônio da cidade. Cerca de 40% das casas já foram substituídas por construções de concreto (UNESCO ref.611). Atendendo a um pedido do governo iemenita, a cidade foi inserida na Lista do Patrimônio Mundial em Perigo da UNESCO.



Figura 2.10: Cidade de Zabid, Iêmen (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: V. Dauge).

Em grande parte da Ásia Central, enormes telhados planos (como terraços) são construídos em terra oferecendo uma dupla vantagem: armazenamento de calor para reduzir as grandes variações de temperatura diárias, além de espaço vital para o armazenamento de colheitas ou equipamentos agrícolas, e espaço para dormir durante os meses quentes.

Na África, também é possível encontrar sinais de construções com terra. Spence e Cook (1983) descrevem que neste continente, sejam nos desertos ou nos oásis onde se instalaram as populações, ainda hoje a terra é o material de construção mais comum, utilizado em uma enorme variedade de maneiras.

A terra batida, outra técnica construtiva de terra também foi amplamente empregada pelas civilizações antigas. Os Ksar (cidades fortificadas), localizados ao sul do Marrocos, foram construídos com esta técnica e possuem normalmente três ou quatro andares (alguns atingindo até mesmo seis ou sete andares).

A Figura 2.11, abaixo, retrata o Ksar de Ait-Bem-Haddou, no Marrocos, situado numa colina à beira do rio Quarzazate. Hoje, a maioria dos habitantes da cidade vive numa aldeia mais moderna, no outro lado do rio, no entanto, dez famílias ainda vivem no Ksar.

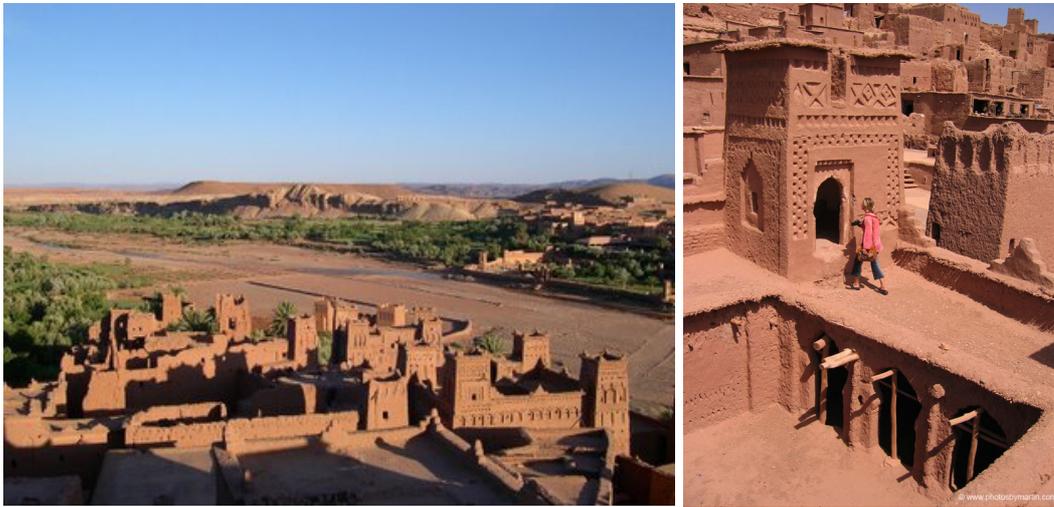


Figura 2.11: Ksar de Ait-Bem-Haddou, Marrocos (www.photosbymartin.com Acesso em mar/2010).

Em Mali, na cidade de Gao, encontra-se a Tumba de Askia, uma estrutura piramidal de 17 m de altura (Figura 2.12). Acredita-se que no lugar esteja enterrado o imperador Askia Mohammad I, que faleceu em 1529. A pirâmide foi construída no final do século XV e é designada como Patrimônio Mundial pela UNESCO.



Figura 2.12: Tumba de Askia, em Gao, Mali (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: T. Joffroy).

A estrutura da pirâmide, testemunha do poder e das riquezas do império que floresceu entre os séculos XV e XVI através do controle do comércio transaariano, notavelmente de sal e ouro, é o primeiro exemplo de um estilo arquitetônico islâmico que mais tarde se espalhou por toda a região (UNESCO

ref.1139). A pirâmide tem sido regularmente revestida ao longo da sua história, em um processo essencial para a manutenção e reparação de estruturas de terra. Para alcançar as partes mais altas da construção e fazer a aplicação do revestimento, utilizam-se como escada os troncos de madeira que auxiliam no substrato da estrutura.

A UNESCO (ref.1139) salienta que a Tumba de Askia é parte de uma extensa tradição de monumentais construções com terra na África Ocidental, incluindo a Mesquita de Djenné (reconstruída em 1906), a mesquita de Agadez (reconstruída entre 1905 e 1907) e as antigas mesquitas de Sankore e Djingaraiber, em Timbuktu, respectivamente de 1300 e 1325 d.C.. As cidades de Djenné e Timbuktu foram ambas inscritas na lista do Patrimônio Mundial da UNESCO em 1988.

A Mesquita de Djenné foi construída em 1280 d.C. por Koy Konboro, o 26º rei de Djenné, no lugar do seu antigo palácio. No final do século XIX, a mesquita caiu em ruínas e foi reconstruída somente em 1906 (Figura 2.13).



Figura 2.13: Mesquita de Djenné (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: F. Bandarin).

Djenné possui muros espessos (nos quais pedaços de madeira de palma dão substrato ao edifício), três torres com aproximadamente 20 m de altura e robustos pilares pontiagudos inteiramente erguidos com terra seca. Localizada próxima ao Saara, a região carecia de materiais de construção, como madeira e pedra, e então os habitantes aprenderam a construir com a lama do rio Níger. Quando essa lama é misturada com casca de arroz e palha e fermentada por um mês, ela se torna muito dura, grossa e resistente à chuva. As estruturas são então erguidas com os blocos secos ao sol e em seguida as paredes são recobertas com revestimento em terra, protegendo o interior do calor do deserto. No entanto, todos os anos a mesquita é danificada pelas chuvas que ocorrem de julho a outubro, que levam uma parte do seu revestimento, obrigando a realização regular de manutenção do monumento, durante a estação seca, dando origem a uma grande festa. Esse

procedimento é conhecido como "rebocadura". As mulheres trazem a água, os homens amassam o barro com os pés e entregam-no aos pedreiros, que se empoeiraram nas escadas para aplicá-lo nas paredes. Os pedreiros mais velhos verificam a qualidade do trabalho (UNESCO ref.116).

Timbuktu, por sua vez, foi a capital intelectual e espiritual além de um centro de propagação do Islã na África, durante os séculos XV e XVI (Figura 2.14). As suas grandes mesquitas, recordações da era dourada de Timbuktu, embora continuamente restauradas, estão hoje sob a ameaça de desertificação (UNESCO ref.119).



Figura 2.14: Timbuktu, Mali (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: F. Bandarin).

Em Gana, ao nordeste da cidade de Kumasi, encontram-se os últimos restos da grande civilização Asante, que atingiu seu ponto alto no século XVIII. Suas tradicionais habitações feitas de barro, madeira e palha, são vulneráveis às mudanças climáticas (UNESCO ref.35) (Figura 2.15).



Figura 2.15: Habitações da civilização Asante, Gana (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: Sébastien Moriset).

A sociedade Hausa, que habita o norte da Nigéria, possui um grande legado arquitetônico como, por exemplo, o portal conhecido como Soron Gabjeje que leva ao Palácio do Emir de Kano, na Nigéria (Figura 2.16). As paredes da arquitetura Hausa são tradicionalmente construídas com blocos de terra, enquanto troncos de palmeiras dividido em feixes são usados para a cobertura. Ao contrário da maioria das outras áreas da África Ocidental, a arquitetura Hausa está nas mãos de um grupo de pedreiros treinados hereditariamente, organizados em corporações conforme ARCHNET Digital Library (2010).



Figura 2.16: Portal Soron Gabjeje, Nigéria (www.wikipedia.com Acesso: mar/2010; autor: S. Chakera).

Para as construções erguidas na Europa, a terra foi utilizada em diversos países, incluindo até mesmo aqueles com grandes índices de pluviosidade como Alemanha, França, Suécia, Noruega e Dinamarca (PINTO, 2008). Na França, por exemplo, nas proximidades de Lyon, foi edificada uma cidade inteiramente com terra, chamada Isle d’Abeau. Em 2008, esta cidade foi listada entre os 45 tesouros do desenvolvimento sustentável da região Rhône-Alpes, segundo a prefeitura da cidade (MAIRIE ISLE D’ABEAU, 2010).



Figura 2.17: Isle d’Abeau (MAIRIE ISLE D’ABEAU, 2010).

Já nas Américas, precisamente no Peru, ainda hoje, quase metade das moradias é feita de terra. Na Figura 2.18 vê-se um exemplo de edificação na região de Trujillo, Peru (BARBOSA E GHAVAMI, 2007). Outros países da América, como Bolívia, Costa Rica, Cuba, Equador, El Salvador, Guatemala, México, além do Brasil, também possuem inúmeras habitações, monumentos e sítios arqueológicos construídos com arquitetura da terra.



Figura 2.18: Edificação em Tujilo, Peru (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

No Brasil, a utilização da terra crua como elemento construtivo chegou através dos portugueses. Com o processo de colonização, foram introduzidas as técnicas do adobe e também a taipa-de-mão e a taipa-de-pilão (Figura 2.19). “Muitas construções coloniais de qualidade, espalhadas por todo o país, foram feitas com a terra crua. Minas Gerais é ainda um exemplo vivo do bom uso que se pode fazer desse material”, afirmaram Barbosa e Ghavami (2007).



Figura 2.19: Casas em Minas Gerais, Brasil (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

Apesar do seu histórico e de ter sido amplamente utilizada nas sociedades antigas, após a 2ª Guerra Mundial, as técnicas de construção com terra foram quase totalmente abandonadas na Europa, permanecendo em uso apenas em países em desenvolvimento (KOUAKOU E MOREL, 2009). Nesta época, a grande difusão de materiais industriais levou ao desprezo, negligência e abandono de técnicas tradicionais de construção com terra. Tais técnicas deixaram de ser utilizadas pelos setores mais ricos da população e foram relegadas às camadas mais pobres da sociedade, que têm dificuldade na perpetuação das velhas tecnologias. Tal como mencionado por Barbosa (2005), houve então uma "perda de tecnologia".

Como os solos variam consideravelmente de acordo com o lugar, a construção com terra ainda depende do conhecimento de pedreiros, impedindo assim uma padronização da composição ideal do material empregado na construção (AZEREDO *et al.*, 2008). Segundo Kouakou e Morel (2009) "cada tipo de solo exige um processo de fabricação específico para que se obtenha um bom material de construção, e o processo, portanto, não pode ser industrializado".

Felizmente, nos últimos 40 anos houve um desenvolvimento da ciência da mecânica dos solos, e conseqüentemente dos seus ensaios e classificação, tornando mais precisa a seleção e especificação de solos para construção (Spence e Cook, 1983). Kouakou e Morel (2009) declararam que recentemente arquitetos começaram novamente a incentivar o uso de BTC, terra batida e adobe na Índia, Austrália, EUA e muitos países da Europa (Figura 2.20).

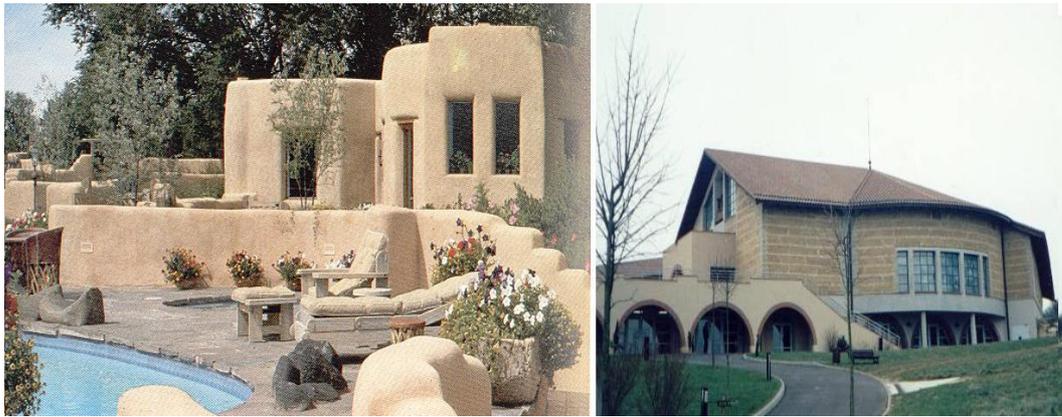


Figura 2.20: Construção moderna nos EUA e igreja na França, ambas de terra batida (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

No Brasil, em junho de 2006, foi inaugurado o Centro Comunitário de Camburi, na divisa entre os estados do Rio de Janeiro e São Paulo. A construção de 216 m², foi erguida com aproximadamente 500 toras de bambu, 1.300 garrafas PET, taipa e adobe. O projeto foi realizado através de uma parceria entre a ONG belga Bamboostic, a comunidade do Camburi, o Instituto Florestal e a Prefeitura de Ubatuba. Uma equipe de trabalhadores da comunidade do Camburi recebeu capacitação para todas as técnicas utilizadas na construção e posteriormente a equipe poderá utilizar o conhecimento adquirido como profissão. "Fizemos questão de ensinar o passo a passo para a comunidade, para que ela crie um meio de desenvolvimento sustentável", disse Sven Mouton, da ONG Bamboostic (BAMBOOSTIC, 2008) (Figura 2.21).



Figura 2.21: Centro Comunitário de Camburi (autor: K. Ghavami).

2.2

Organizações, centros de estudo e projetos

Azeredo *et al.* (2008) declararam que é necessário estimular os estudos sobre a terra e suas propriedades de engenharia para que o material possa ser novamente promovido à categoria de material de construção viável. Outra grande preocupação é a conservação do patrimônio arquitetônico de terra existente em diversos países. Essa é uma tarefa que requer um esforço interdisciplinar e cooperação internacional.

No final dos anos 1990, houve um avanço considerável na utilização da terra através de uma série de conferências internacionais, treinamentos e formação de comitês nacionais e internacionais dedicados à essa causa. Através desses intercâmbios de informação, uma rede de profissionais, cientistas e acadêmicos foi estabelecida.

Em Novembro de 1997, o Centro Internacional para a Construção com Terra - Escola de Arquitetura de Grenoble (CRATerre-EAG), o Getty Conservation Institute (GCI) e o Centro Internacional para o Estudo da Preservação e Restauração de Bens Culturais (ICCROM), estabeleceram um programa conjunto chamado Projeto TERRA para estudar a conservação da arquitetura da terra. Em 2005, o Projeto TERRA encerrou a sua parceria oficial, mas as instituições envolvidas continuaram a colaborar estreitamente em várias atividades (ACHENZA *et al.*, 2009).

No mesmo ano, o Diparch-Università di Cagliari (UNICA), a Escola Superior Gallaecia (ESGallaecia) e o CRATerre tornaram-se formalmente os parceiros europeus para a Cátedra UNESCO de Arquitetura da Terra. Este acordo de colaboração tem proporcionado desde então parcerias contínuas em projetos de investigação, publicações de livros, intercâmbios de estudantes e professores, e colaboração em eventos científicos.

Em outubro de 2001, surgiu o PROTERRA: um projeto de investigação com duração de 4 anos do Programa Ibero-Americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento (CYTED), dentro do Subprograma Tecnologia para Vivenda de Interesse Social (HABYTED). Seu objetivo é a transferência de tecnologia de construção com terra, incentivando o seu uso através de projetos demonstrativos, publicações e cursos, a fim de viabilizar uma produção massiva de habitações de interesse social (NEVES E BACA, 2010). O PROTERRA foi iniciado com a participação de sete instituições, provenientes de sete diferentes países ibero-americanos; ao final do projeto, contava com 100 membros oriundos de 18 países ibero-americanos. Com a finalização do projeto foi criada então a Rede Ibero-Americana Protterra com o objetivo de divulgar a construção com terra nos países ibero-americanos. Atualmente, o PROTERRA coordena discussões sobre procedimentos de ensaios e parâmetros para a qualificação dos produtos (como adobe, BTC e alvenaria) além de prosseguir com as atividades de capacitação e difusão das pesquisas e construções com terra.

2.3

Propriedades da terra para uso da terra na construção civil

O uso do solo em construção tem uma série de vantagens sociais, culturais, técnicas e econômicas (VIÑUALES, 2005). Em primeiro lugar, a terra para

construção é amplamente disponível e seu uso é sustentável, pois consome menos energia durante a sua aplicação em construções e utiliza menos água

A terra não é perigosa no manuseio e não contamina o meio ambiente em qualquer uma das fases (extração, transporte, preparação, instalação e manutenção), pois não elimina gases e não gera nenhum tipo de poluente. O cimento, por sua vez, é a terceira maior fonte de emissão de dióxido de carbono do planeta, atrás apenas da geração de energia elétrica e transporte, sendo responsável por 7% a 10% do total de emissões deste gás, segundo o portal do Ministério de Minas Energia (CONPET, 2005). Além disso, se não tiver sido estabilizada, a terra pode ser facilmente reincorporada à natureza ou reutilizada diretamente em outra construção.

Uma vez que não exige equipamentos sofisticados, as ferramentas para sua utilização geralmente são facilmente obtidas e podem ser fabricadas ou adaptadas pelos próprios trabalhadores (FREIRE, 2003). Como um material local, economiza tempo e dinheiro pois não precisa ser transportado. Certos materiais industrializados duplicam o seu custo quando são transportados por uma distância de apenas 100 km. Todas essas características em conjunto levam a um menor custo construtivo, que pode ajudar a reduzir o déficit habitacional em países em desenvolvimento, e ainda possibilitam o desenvolvimento sustentável, tão incentivado hoje em consequência do aquecimento global (BARBOSA, 2005).

As construções com terra também têm um bom isolamento térmico, podendo armazenar calor e regular as mudanças de temperatura entre dia e noite. Sua atuação contra o frio extremo e o calor é excelente, especialmente em locais onde a variação de temperatura é grande (VIÑUALES, 2005; BARBOSA, 2005; FREIRE, 2003). As paredes de terra crua podem absorver maior quantidade de umidade do que a maioria dos outros materiais de construção. Ao absorver umidade excessiva, e depois liberá-la quando estiver baixa, a terra crua aumenta o conforto interior, evitando fenômenos de condensação e expansão do material.

Quanto à resistência mecânica, quando bem executadas e protegidas das intempéries, as construções com terra podem resistir durante muitos anos, como foi mostrado na seção 2.1. De acordo com Dethier (1982), na base de uma pirâmide construída em terra crua no Cairo, Egito, e erguida pelo rei Asydis, encontra-se até hoje a inscrição: “Não me despreze, comparando-me às pirâmides de pedra: estou acima delas como Júpiter acima de outros deuses, por ter sido construída com tijolos feitos de limo do fundo do lago”.

Apesar de todas essas vantagens, existem ainda muitas dificuldades na aplicação de “materiais não convencionais”, como a terra, na construção civil. As tecnologias antigas, que têm sido muitas vezes esquecidas e não preservadas nas cidades grandes, não são levadas em consideração no momento de construir, pois há falta de profissionais e de interesse em escolas, faculdades e centros de pesquisa, locais que poderiam ajudar a melhorar o material, tornando-o mais conhecido e até mesmo propondo novas aplicações.

Em muitos países da América do Sul, o adobe não é empregado em obras públicas, os bancos não oferecem facilidades de crédito para a construção com terra (mesmo que seja para ampliar ou melhorar edifícios já existentes) e, acima de tudo, o recenseamento tende a classificar as casa de terra como "inadequadas" e seus usuários como pessoas que carecem de melhores condições de moradia (VIÑUALES, 2005).

Outra dificuldade, segundo Freire (2003), é a sua sensibilidade à presença de água (podendo provocar a desintegração do material e falhas estruturais), altas

taxas de retração/expansão (levando ao aparecimento de fissuras quando o material se encontra exposto a variações climáticas) e baixa resistência à abrasão, requerendo reparos frequentes e manutenção. No entanto, esse obstáculo pode ser superado com o uso de estabilizantes, misturados com a finalidade de tornar o solo mais resistente e coeso a partir da cimentação de suas partículas e de reduzir os movimentos de retração e expansão, tornando-o menos ou totalmente impermeável à água.

2.4

Solo: definição e classificação

Os solos são constituídos de proporções e tipos variáveis de minerais, gases, água e matéria orgânica. Para um engenheiro civil, sob o ponto de vista da mecânica dos solos, solo é um corpo passível de ser escavado, sendo utilizado como substrato para construções ou material de construção.

O solo é um produto do intemperismo químico (oxidação, hidratação, carbonatação), físico (através de agentes como vento, chuva, rios, marés, geleiras e mudanças na temperatura) e biológico (efeitos químicos da vegetação) das rochas (CAPUTO, 1980).

Após o intemperismo, o solo formado pode permanecer no mesmo lugar ou ser transportado pela água ou pelo ar. Quando depositado, o solo sofre mais transformações, seja por meio das raízes das plantas e materiais orgânicos da superfície e/ou através da percolação da água, contendo minerais dissolvidos e matéria orgânica.

Spence e Cook (1983) lembram que a formação do solo é então afetada pelo clima, vegetação, topografia, geologia e história geológica. Assim, compreensivelmente, existe uma grande variedade de solos com diferentes propriedades. A escolha correta da matéria-prima é então o principal fator para garantir o sucesso da aplicação da terra na construção, independentemente da técnica a ser utilizada.

“Os solos apropriados para a construção geralmente estão situados no sub-solo, também chamado de *horizonte B*, livres de matéria orgânica. Nas zonas semi-áridas e áridas, é possível encontrar solos adequados na superfície, depois de eliminar pedras, raízes e todo material orgânico presente” (NEVES *et al.*, 2010).

As propriedades do solo que mais interferem no seu uso na construção são composição granulométrica e mineralógica, plasticidade, retração, umidade e grau de compactação (durante a sua execução). Por meio de procedimentos de laboratório, é possível conhecer a granulometria de determinado solo e aferir sobre a sua adequabilidade para a construção. Também é possível distinguir as porcentagens de elementos constituintes do solo. O ensaio granulométrico, além de facilitar a escolha entre as possíveis técnicas construtivas de terra, permite saber como corrigir a composição do material através da adição de elementos (técnica conhecida como estabilização).

A mais básica classificação dos solos é feita em termos da dimensão das suas partículas. O solo pode então tratar-se de uma mistura de argila, silte e areia, contendo, por vezes, agregados maiores, como pedregulhos. Na Tabela 2.1 estão representadas as classificações adotadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AASHTO (American Association for State Highway and

Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing Materials) e CEN (Comité Européen de Normalisation). No Brasil, adota-se a ABNT/NBR 6502/95; na França, a EN ISO 14688.

Tabela 2.1: Classificação das partículas do solo de acordo (em mm).

Partícula	ABNT (mm)	AASHTO (mm)	ASTM (mm)	CEN (mm)
Pedregulho	2 - 60	2 - 60	4,75 - 60	2 - 20
Areia	0,06 - 2	0,075 - 2	0,075 - 4,75	0,02 - 2
Silte	0,002 - 0,06	0,005 - 0,075	0,005 - 0,075	0,002 - 0,02
Argila	< 0,002	0,001 - 0,005	0,001 - 0,005	< 0,002

A distribuição dos grãos do solo é extremamente importante para as construções com terra porque o comportamento mecânico do material depende da dimensão das partículas que o compõem. Cascalho e areia formam o esqueleto do material sólido. A partir do contato entre os grãos, a fração de areia torna a estrutura mais resistente ao estresse mecânico. O silte reduz o atrito interno permitindo um rearranjo quando o solo está compactado. Para a utilização na construção civil, a argila pode ser considerada um dos principais componentes do solo, pois atua como um ligante em função da presença de argilominerais. "Dependendo de qual dos três componentes é dominante, falamos de um solo argiloso, siltoso ou arenoso" (MINKE, 2000).

2.5 Argila e sua importância no solo

Segundo Minke (2000), a argila é o produto do intemperismo do feldspato e outros minerais. As argilas são caracterizadas por sua dimensão granular e por uma estrutura lamelar, com diferentes camadas. A distância entre as lamelas é chamada de distância interfoliar (Figura 2.22). Neste espaço podem existir íons de elementos alcalinos ou alcalinos-terrosos, que reagem facilmente com a água. Assim, a argila expande ou retrai à medida que absorve ou perde umidade.

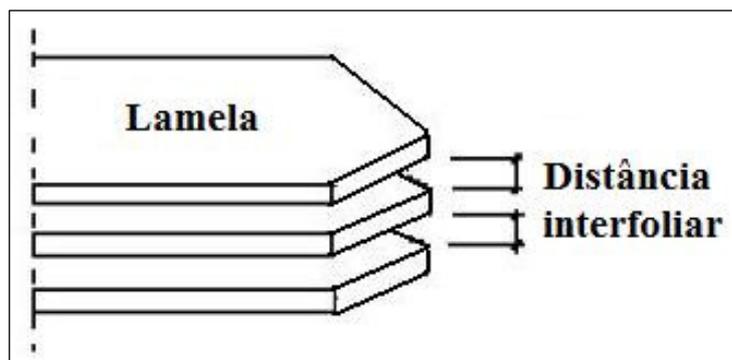


Figura 2.22: Partícula de argila (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

Existem três tipos principais de argilominerais (partículas menores e quimicamente ativas presentes nos solos argilosos) encontradas na natureza. Em função de cada tipo, a ligação entre lamelas pode variar de fraca a forte, permitindo ou não a penetração de água (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

- caulinita (praticamente estável em contato com a água e não apresenta expansão significativa);
- illita (instável em contato com a água e um pouco expansiva);
- montmorilonita (água penetra facilmente, tornando-a instável em contato com a água; apresenta uma expansão significativa e não deve ser utilizada na construção civil).

Sendo quimicamente ativa e por possuir propriedades coesivas, a argila age como um ligante para todas as partículas maiores no solo (assim como faz o cimento no concreto), dando coesão ao material. A argila deve sempre ser manipulada na presença de água (BARBOSA *et al.*, 1997). A presença de partículas de argila no solo reduz e até impede a necessidade de se utilizar alguns ligantes industriais, como cal ou cimento (KOUAKOU E MOREL, 2009).

2.6 A água no solo

A quantidade de água presente no solo no momento da sua utilização tem uma grande influência sobre a qualidade do produto final quando se fala em construção civil.

Normalmente, o solo é composto por três fases: sólida (grãos), líquida (água) e gasosa (as bolhas de ar e vapor de água). Enquanto os grãos representam sempre uma fase separada, as fases líquidas e gasosas podem ser misturadas em uma única fase, de acordo com a quantidade relativa de água e ar no solo (OLIVIER, 1994). Se a quantidade de ar presente no solo for pequena em relação à água, elas são consideradas como uma única fase (Figura 2.23 A). Se a quantidade de ar for grande, o solo tem baixa umidade e os grãos não podem deslizar uns sobre os outros. Neste último caso, as fases líquida e gasosa são independentes (Figura 2.23). Conclui-se então que a mobilidade da fase sólida depende crucialmente da água.

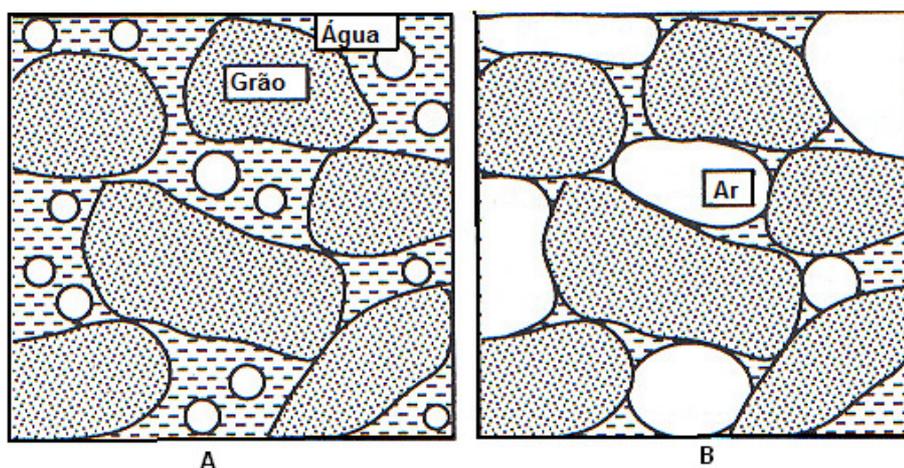


Figura 2.23: Diferentes fases no solo - (A) duas fases (grãos e água-ar); (B) Três fases (grãos, água e ar, separadamente) (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

2.6.1 Densidade seca e umidade ótima

A densidade seca (γ_d) (ou peso específico máximo seco) corresponde ao peso da fração sólida seca dividida pelo volume total do bloco. Em outras palavras, é a densidade após a eliminação da água (BARBOSA E GHAVAMI, 2007). Este é um dos principais parâmetros para o uso do solo em engenharia e possui uma influência direta sobre a resistência à compressão (MOREL E KOUAKOU, 2009).

A densidade seca também pode ser calculada como:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + W} \quad (2.1)$$

Onde:

γ_d - densidade seca (g/dm^3)

γ_h - densidade úmida (g/dm^3)

W - teor de água (%)

Ao se trabalhar com o solo compactado, surge o conceito de umidade ótima. Se uma amostra de solo é compactada com uma energia de compactação específica, a sua densidade resultante dependerá do seu teor de água. Ou seja, dependendo da quantidade de água presente no material, para uma mesma energia de compactação, obtém-se uma diferente densidade seca. Conclui-se então que existe um valor de umidade ótima com o qual é possível obter a máxima densidade seca do material (BARBOSA E GHAVAMI, 2007). É possível então traçar uma curva, para uma energia de compactação fixa, na qual a densidade seca do solo é desenhada em relação ao teor de água. Pode-se também, para o mesmo solo, traçar uma curva representando a densidade seca do material obtida caso todo o ar fosse removido. Essa é a curva de saturação ($S=100\%$), que decresce à medida que o teor de água aumenta. Na curva de compactação do solo, a densidade seca vai aumentando com o teor de água até um determinado valor (pico da curva), a partir do qual ela começa a diminuir aproximando-se da curva de saturação. Esse pico representa a umidade ótima (w_{ot}) e a densidade máxima seca (γ_{dmax}) do material (Figura 2.24). Sabendo-se que quanto maior a densidade seca, maior é a resistência, busca-se trabalhar o mais próximo possível do valor de umidade ótima.

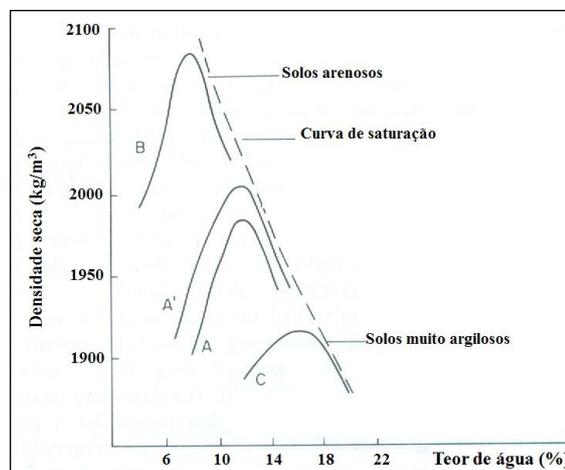


Figura 2.24: Densidade seca x teor de água (adaptado de SPENSE E COOK, 1983).

A Figura 2.24 também mostra a relação entre a densidade seca e o teor de água para diferentes tipos de solo. Solos muito argilosos (Curva C) têm a tendência de possuir as menores densidades secas e as maiores umidades ótimas. No entanto, solos arenosos (Curva B) possuem maiores densidades secas e menores umidades ótimas. Para um mesmo solo, se a energia de compactação aumenta, a curva move-se de A para A', ou seja, a densidade seca aumenta, mantendo-se o valor da umidade ótima.

2.6.2 Limites de plasticidade

À medida que a quantidade de água aumenta em um solo com presença de argila, ele passa por três fases distintas: sólido, plástico e líquido. Quando a umidade é muito baixa, a mistura de solo e água permanece sólida e o manuseio é difícil. Com o aumento da umidade, o material aglutina, mantendo a sua forma. Neste ponto, que separa os estados sólidos e plásticos, o solo começa a apresentar um comportamento plástico, sendo capaz de mudar sua forma sem alterar o seu volume. A argila presente na mistura é a responsável por este comportamento. É o chamado Limite de Plasticidade (LP). Ao aumentar a quantidade de água, a mistura permanece plástica até certo ponto, quando o material perde a capacidade de aglutinar e se torna fluido (líquido). Este ponto é chamado de Limite de Liquidez (LL) (Figura 2.25) (BARBOSA E GHAVAMI, 2007). Existe ainda o Índice de Plasticidade (IP) dado pela equação abaixo:

$$IP = LL - LP \quad (2.2)$$

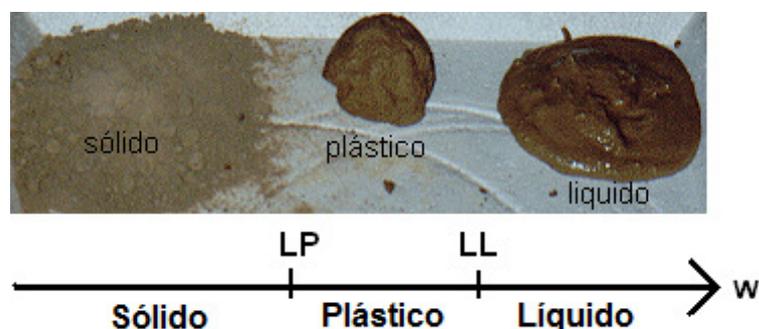


Figura 2.25: Limites de consistência (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

A determinação destes índices de plasticidade, também chamados de limites de Atterberg, é feita através de ensaios normalizados no Brasil pela NBR 7180 (1984). A Tabela 2.2 apresenta a classificação dos solos em função destes limites:

Tabela 2.2: Classificação dos solos pelo Índice de Plasticidade (NEVES *et al.*, 2010).

Tipo de Solo	IP (%)	LL (%)
Arenoso	0 a 10	0 a 30
Siltoso	5 a 25	20 a 50
Argiloso	> 20	> 40

O conhecimento destes parâmetros leva então a uma primeira ideia da aptidão do solo para uso na construção. De acordo com Barbosa e Ghavami (2007), se o LL exceder 55% ou se o IP for superior a 45%, o solo tem uma quantidade excessiva de argila e não é adequado para uso na construção civil. Da mesma forma, o solo não deve ter pouca ou nenhuma argila, porque a falta de ligante gera falta de coesão. Um bom solo para a construção deve ter um Índice de Plasticidade (IP) de aproximadamente 7%.

2.6.3

Ação da água no solo: expansão e retração

Os movimentos de retração e expansão que ocorrem no solo a partir da variação de umidade são função da quantidade e do tipo de argilomineral existente no mesmo. Esses movimentos provocam fissuras, permitindo a penetração da água e contribuindo para a perda de resistência e degradação do material.

A expansão ocorre porque a água absorvida pelo material penetra no meio das estruturas laminares, formando um pequeno filme de água ao redor das lamelas de argila. No entanto, a expansão só acontece se o solo entrar em contato com água suficiente para que ele saia do seu estado sólido, tornando-se plástico. A absorção de umidade do ar, por exemplo, não causa expansão.

A retração, por sua vez, é causada pela redução da distância interlaminar quando a água evapora e as partículas do solo se aproximam uma das outras. Em seguida, as lamelas se reorganizam, devido às suas forças de atração elétrica.

Tal como mencionado por Barbosa e Ghavami (2007), em princípio, quanto maior é o teor de argila maior será a retração. No entanto, o tipo de argilomineral presente na argila também influenciará. Assim, a ilita retrai mais do que a caulinita, por exemplo. Argilas montmoriloníticas, por sua vez, retraem bem mais do que as outras duas em função da sua ligação interfoliar fraca, que permite uma grande absorção e perda de água.

Existe o chamado Limite de Retração (LR), determinado pelo grau de umidade a partir do qual o volume do solo permanece constante quando ocorre a evaporação da água (Figura 2.26).

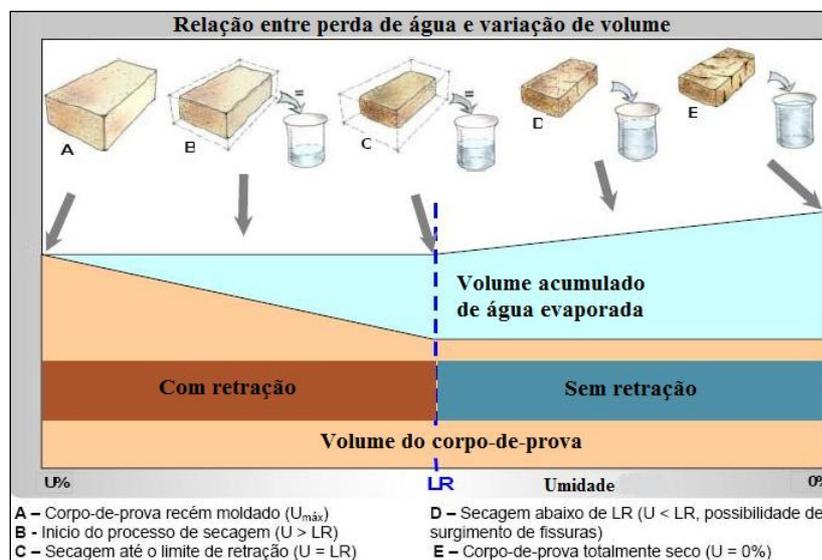


Figura 2.26: Relação entre o limite de retração (LR) e as variações de volume, do solo e da água evaporada, durante a secagem (NEVES *et al.*, 2010).

Pode-se observar pela Figura 2.26 (acima) que abaixo do Limite de Retração, a evaporação da água continua ocorrendo, mas o volume do solo se mantém constante, ocasionando então o surgimento de fissuras.

Tanto a expansão quanto a retração são desvantajosas para o uso do solo na construção civil. Em algumas técnicas construtivas de terra, a quantidade de água usada na fabricação deve ser muito maior do que o valor ideal. Depois, este excesso de água irá evaporar, causando a retração. Quando há impedimentos à livre circulação da água no material (como em técnicas mistas), uma intensa fissuração ocorre (BARBOSA E GHAVAMI, 2007). Com relação à umidade do ar, se a água entrar nas paredes, mas depois evaporar, não é grave. No entanto, se a água não consegue sair, começa a ocorrer degradação do material, decorrente das reações entre a água acumulada e os nitratos e sulfatos presentes no solo.

Em algumas regiões, as mudanças no clima local e condições de chuva fazem com que os blocos de terra expandam ou retraiam, perdendo sua resistência. Segundo Guetalla *et al.* (2006), em Gana, "vilas inteiras construídas com terra foram completamente destruídas durante as inundações de 1970".

Sabendo que a ação da água é negativa para a construção com terra, certas medidas são indispensáveis para evitar a perda de resistência. É possível reduzir a ação da água construindo boas fundações, elevando-as até uma altura segura, protegendo a construção com uma boa cobertura e protegendo as paredes com um revestimento uniforme.

A proteção da base da estrutura contra a umidade do solo é essencialmente importante. O princípio básico de construir com terra é evitar o contato entre as paredes e o chão. A capilaridade da água presente no terreno onde a estrutura está sendo erguida deve ser prevista e evitada, por meio da utilização de um solo bem compactado e estável, previsão de sistemas eficazes de drenagem de águas periféricas e/ou execução de barreiras de vapor entre a fundação e o início da parede da estrutura. Paredes abaixo do nível do solo e aquelas até uma altura de 30 cm devem ser construídas em alvenaria normal ou de concreto, para evitar a migração ascendente de água.

A cobertura também é um elemento indispensável na durabilidade da estrutura. A sua inexistência é prejudicial e causa grande degradação nas construções com terra. A borda do telhado deve ser suficientemente longa para proteger a parede. No Iraque, o teto das estruturas tradicionais é construído com diversas camadas, sendo a última delas uma mistura de argila e feno, compactada, de aproximadamente 60 cm de espessura. De acordo com Kadir (1990), após chuvas e tempestades de neve, essa última camada é recompactada com o auxílio de rolos cilíndricos manuais. A compactação reduz buracos e fissuras na camada superior e reduz a possibilidade de penetração de água naquelas imediatamente inferiores. No entanto, algumas patologias são irreparáveis e, ao final de três ou quatro anos, a última camada do teto deve ser completamente removida e uma nova deve ser aplicada. A maioria das estruturas construídas desta maneira consegue resistir por mais de 50 anos.

Entretanto, mesmo seguindo as recomendações para as fundações e coberturas, o uso de estabilizantes pode ser necessário para melhorar as propriedades mecânicas do material estrutural, garantindo uma maior vida útil para a edificação.

2.7 Estabilização do solo

A estabilização do solo consiste na modificação das características do material para que se obtenham propriedades compatíveis com uma aplicação particular, além de assegurar a conservação dessas melhorias durante toda a vida útil da estrutura (BARBOSA *et al.*, 1997). As duas principais razões para o uso da estabilização são: limitar a sensibilidade do material à ação da água e aumentar sua resistência. Como descreveram Yetgin *et al.* (2008), “para melhorar a durabilidade dos adobes, sua resistência deve aumentar e sua absorção de água deve diminuir”.

Embora exista uma enorme variedade de técnicas de estabilização do solo e aditivos que podem ser utilizados, é possível dividir as ações estabilizadoras em três classes: estabilização por compactação mecânica, estabilização física (por adição de fibras) e estabilização química (por adição de aglutinante ou adição de impermeabilizante).

Conforme Spence e Cook (1983), o efeito da compactação é o acréscimo da densidade do solo, aumentando também a sua resistência. Ao mesmo tempo, ela reduz a proporção de espaços para o ar ou água, restringindo a passagem de água pelo material e diminuindo os efeitos das variações dimensionais associadas às mudanças no teor de água. A compactação atinge melhores resultados em solos com uma ampla gama de partículas diferentes e com uma pequena quantidade de argila. A densidade de compactação alcançada é sensível ao teor de água no momento da compactação. Os autores afirmam ainda que as técnicas de construção com solo mais eficientes são aquelas nas quais a compactação é utilizada, mas para resultados ainda melhores, ela pode ser combinada com a adição de um aglutinante ou um impermeabilizante.

A estabilização física, por meio da adição de fibras (naturais ou artificiais), resulta em um material compósito. Em um compósito de solo-fibra, as fibras têm a propriedade de aumentar a resistência à tração, prevenir fissuras durante a secagem através da distribuição de tensões ao longo de todo o compósito e melhorar o comportamento pós-fissuração, dando ductilidade e capacidade de absorver energia (BARBOSA E GHAVAMI, 2007). Segundo Manzano-Ramirez *et al.* (2007), com a adição de fibras naturais qualquer forma geométrica pode ser alcançada mais facilmente e a durabilidade do compósito pode ser aperfeiçoada. O primeiro material produzido pelo Homem foi um compósito de solo reforçado com fibras vegetais, na Pérsia (MOREL *et al.*, 2000).

Os aglutinantes são materiais que agem formando um esqueleto rígido no solo e ligando as suas partículas, aumentando assim sua resistência e eliminando ou reduzindo a retração/expansão. Cimento e cal estão nesta categoria, apesar de trabalharem de maneiras diferentes. Impermeabilizantes são materiais que conferem uma propriedade hidrorrepelente ao solo, a fim de restringir as alterações dimensionais. Nesta categoria, encontra-se o betume.

De acordo com Mesbah *et al.* (2004), a introdução de aglutinantes ou impermeabilizantes no solo (ou no compósito de solo-fibra) deve ser feita entre 4% e 10% do peso de solo seco. No entanto, os autores lembram que a utilização destes materiais aumenta significativamente os impactos ambientais e os custos, impedindo assim sua maior utilização nos países em desenvolvimento. Se for indispensável, sua utilização é mais econômica se realizada somente no revestimento ao invés de ser empregado na estrutura como um todo (BUI, 2008).

Para técnicas construtivas nas quais se utiliza estabilização química, o tipo de estabilizante pode ser escolhido a partir do gráfico abaixo, onde são relacionados o índice de plasticidade (IP) e a granulometria do solo com o aditivo/impermeabilizante (Figura 2.27)

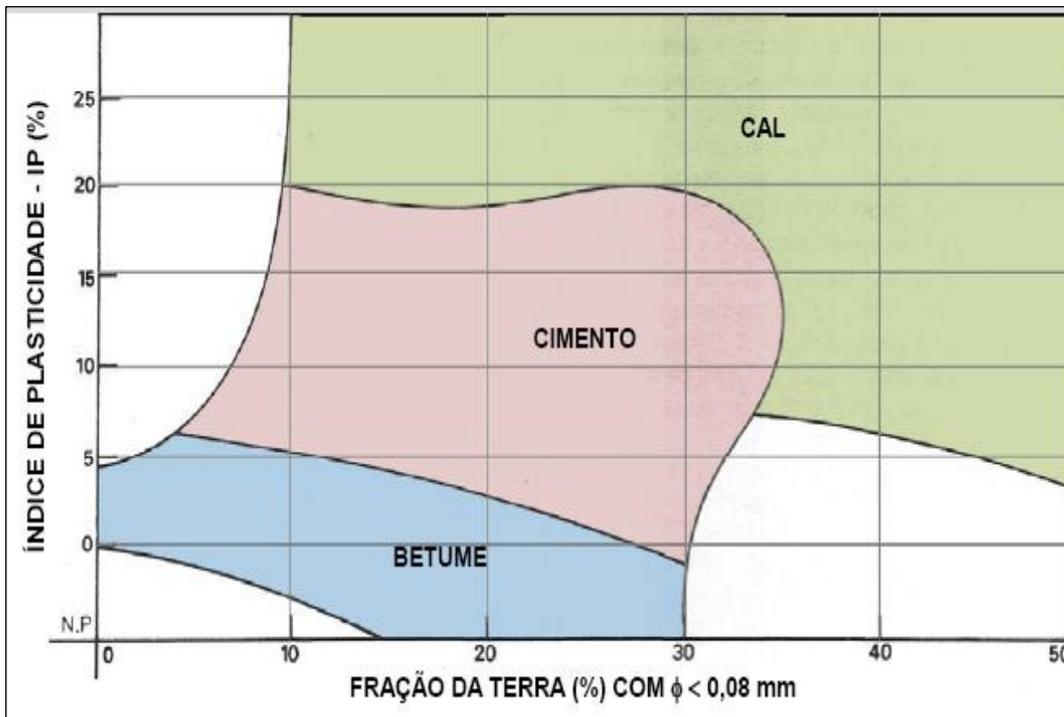


Figura 2.27: Escolha do tipo de estabilizante em função do Índice de Plasticidade (IP) e da granulometria da terra (Houben e Guillaud *apud* NEVES *et al.*, 2010).

2.7.1

Adição de cimento

A utilização do cimento como estabilizante é uma das mais simples de ser efetuada, sendo mais indicada para solos com baixos teores de argila (ou solos que contenham argilas de baixa atividade). Esses solos são também os mais compatíveis com a compactação mecânica. Freire (2003) expôs que nesses casos obtém-se um material de alta resistência mecânica, além de maior resistência à água.

É importante lembrar que o cimento deve ser sempre misturado ao solo seco já que começa sua reação imediatamente quando entra em contato com a água. Ao longo da sua hidratação com a água contida no solo, o cimento se transforma em cristais estáveis, resistentes à água, criando ligações entre os grãos de solo. Essa reação, no entanto, necessita de uma quantidade suficiente de água. Assim, visto que o cimento chega à sua dureza e resistência máxima somente após 28 dias, é necessário que os blocos de terra mantenham-se úmidos durante todo esse tempo.

Minke (2000) afirmou que o cimento interfere na coesão própria das argilas e que "quanto maior o teor de argila, maior deve ser a quantidade de cal ou cimento adicionado". Um baixo teor de cimento provoca a degradação da estrutura dos blocos de argila através do desenvolvimento de poros capilares.

É importante observar que a porcentagem de adição de cimento depende da forma da utilização da terra (em estado plástico ou compactada) e do tipo de argila presente. Segundo Barbosa e Ghavami (2007), porcentagens de cimento de 3% a 5% em peso em um solo argiloso podem provocar queda na resistência em relação ao material não estabilizado. Se a argila for montmorilonítica, somente porcentagens acima de 8% serão suficientes para gerar um ganho de resistência.

Spence e Cook (1983) estudaram dezesseis solos diferentes e descobriram que aqueles com densidade seca após a compactação de menos de $1,65 \text{ g/cm}^3$ requerem mais de 10% de cimento em peso, tornando o material não econômico. Para eles, a adição de 5% de cimento em peso seco de solo é o mínimo recomendável. Os autores demonstraram também que a relação entre a resistência à compressão e a densidade seca do solo estabilizado com cimento é praticamente linear. Vale ressaltar que a densidade propriamente dita de um solo estabilizado depende do teor de umidade na compactação e do esforço de compactação.

Olivier e Mesbah (1986) testaram à compressão estática Blocos de Terra Comprimida fabricados a partir de quatro solos com curvas granulométricas praticamente idênticas, mas com porcentagem relativa variável de caulinita e montmorilonita (0%, 33%, 66% e 100%). Esses quatro solos foram compactados a 2MPa, 4MPa, 6MPa e 8MPa, e estabilizados com cimento CPA 55 (2% e 4%). Os corpos-de-prova foram testados depois de 15 dias sendo conservados à 24 °C. Os resultados obtidos para densidade seca e resistência à compressão mostraram a importância do fator “tipo de argila”. Para o solo rico em montmorilonita, observa-se uma perda de resistência quando a estabilização é feita com 2% de cimento e um aumento de resistência para 4% de cimento sem, no entanto, alcançar o valor de resistência para o solo não estabilizado. O solo rico em caulinita apresenta-se muito sensível à estabilização com cimento: para uma compactação dos blocos realizada com 4 MPa, a resistência à compressão passou de 0,9 MPa no solo não estabilizado para 3,8 MPa no solo estabilizado com 4% de cimento.

Walker e Stace (1997) investigaram o comportamento de blocos e revestimentos fabricados com proporções variáveis de mistura de um solo residual vermelho-escuro e argiloso (rico em caulinita) e areia bem graduada. Os blocos e o revestimento foram estabilizados com cimento Portland comum. Os blocos receberam teores de 5% e 10% de cimento por peso de solo; já os revestimentos foram estabilizados com 5%, 10% e 15%. Foram inseridos também nos testes os revestimentos tradicionais de cal:cimento:areia (1:1:6, 1:2:9 e 1:3:12 em volume). Os autores observaram que a resistência à compressão, a retração por secagem e a durabilidade dos blocos e revestimentos melhoram com o aumento do teor de cimento.

2.7.2 Adição de cal

De acordo com Spence e Cook (1983), a cal foi usada como argamassa para blocos na construção de paredes em alguns exemplos notáveis como o Palácio de Persópolis, a Grande Muralha da China, as pirâmides do Egito, o Templo de Apolo na Grécia e o Coliseo de Roma.

A cal não é um material cimentício e por isso não pode formar um esqueleto rígido no solo. Na presença de água, ocorre uma reação entre a cal e certas

partículas de argila do solo formando assim um gel insolúvel parecido com aquele formado pelo cimento Portland com a vantagem da cal ser mais ecológica do que o cimento. Contudo, essa reação é lenta, produz um material cimentício de resistência mais baixa, depende da presença de minerais adequados no solo e a proporção de cal necessária para assegurar a sua dispersão no solo é consideravelmente maior do que o estritamente necessário para que a reação ocorra.

Os melhores solos para a estabilização com cal, de acordo com Spence e Cook (1983), são aqueles com teores significativos de minerais de argila (acima de 20%) e por isso menos adequados para a estabilização por compactação e mais suscetíveis a alterações dimensionais. Todavia, a presença da cal nesses solos causa um efeito conhecido como troca de cátions: troca de íons metálicos na superfície das partículas de argila que controlam a tendência de absorção de água. Isso reduz a expansibilidade do solo e diminui seus limites de liquidez e plasticidade, tornando-o mais adequado à compactação e aumentando sua resistência à compressão.

Os autores lembram também a relação da reação da cal com o tempo. Diferentemente das misturas de solo com cimento, utilizando-se a cal em temperaturas ambientes, o acréscimo de resistência só é verificado a partir do primeiro mês, e continua crescendo nos meses seguintes. Infelizmente, essa evolução da resistência em longo prazo não possui um grande valor para construções normais, onde uma resistência específica deve ser atingida geralmente antes do primeiro mês. No entanto, esses prazos caem muito se a cura for realizada em altas temperaturas. Por exemplo, a 50 °C, uma resistência que antes só seria alcançada no 63º dia, pode ser obtida em uma semana.

2.7.3 Adição de betume

O betume misturado ao solo repele a água, reduzindo as variações dimensionais, aumentando a resistência e diminuindo a erosão da superfície associada à ação da água. Ele é largamente utilizado em solos argilosos como um aditivo na fabricação de adobe.

De acordo com Fitzmaurice (*apud* Spence e Cook, 1983), para a estabilização de adobe, se o solo tiver um alto teor de areia (mais de 50%), deve ser aplicada uma porcentagem de betume em peso entre 4% e 6%; solos com teor médio de areia (aproximadamente 50%), entre 7% e 12% de betume em peso; finalmente, para solos argilosos, entre 13% e 20% de betume em peso.

As fibras também podem ser tratadas com hidrofungentes antes de serem adicionadas ao solo. Ghavami *et al.* (1999) estudaram a impermeabilização de fibras de coco e de sisal com o piche e a cipla, dois materiais líquidos provenientes do betume e comumente empregados na construção civil no Brasil. Todas as fibras possuíam 100 mm de comprimento e estavam completamente secas antes dos ensaios. Verificou-se que embora a absorção de água de sisal não estabilizado seja muito maior do que a das fibras de coco, quando tratadas com piche a absorção do sisal passa a ser 30% menor do que aquela das fibras de coco naturais. Esse resultado foi atribuído à microestrutura de fibras de sisal, que é mais porosa em comparação às fibras de coco.

2.7.4 Adição de fibras

A utilização de fibras como reforço de solos é uma técnica empregada pelo Homem desde muitos anos. Camadas intercaladas de solo e manta de raízes foram empregadas na Mesopotâmia (1400 a.C.) para a construção de muralhas. Na Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos incas, no Peru, também se encontram indícios da utilização de fibras (CASAGRANDE, 2001).

Apesar do uso de materiais fibrosos remontar à antiguidade, seu emprego na construção civil em escala industrial só aconteceu de forma mais generalizada no começo do século XX, segundo Agopyan e Savastano Jr (2003). Os materiais fibrosos passaram a ser estudados de fato na engenharia civil somente a partir da década de 60, nos países desenvolvidos. O estudo de Krenchel, em 1960, foi pioneiro e trouxe uma contribuição especial para a teoria dos compósitos à base de matrizes frágeis além de resultados experimentais com fibra de vidro comum (AGOPYAN E SAVASTANO JR, 2003).

O estudo sistemático de fibras com finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra em 1970. O Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED), na Bahia, iniciou seus estudos sobre o tema em 1980 e foi o pioneiro do assunto no Brasil. Agopyan (*apud* AGOPYAN E SAVASTANO JR, 2003) relacionou cerca de vinte tipos de fibras potencialmente úteis para a construção civil. Em meados da década de noventa, muitos livros de engenharia de materiais abordaram esse assunto (CASAGRANDE, 2001).

As fibras podem ser classificadas em quatro grandes grupos: poliméricas, minerais, metálicas e vegetais. Alguns exemplos de fibras poliméricas são polipropileno, polietileno, poliamida (conhecida como Kevlar) e poliéster (atualmente mais conhecida como polietileno tereftalato, cuja sigla é PET) (CASAGRANDE, 2001). Esta última é o material constituinte de garrafas plásticas e representa um grave problema ambiental uma vez que sua produção e consumo vêm aumentando muito nos últimos anos e somente uma pequena porcentagem é reciclada. Atualmente, vários formatos de fibras poliméricas têm sido empregados como reforço de solos. Segundo Casagrande (2001), as chamadas fibriladas que “possuem um formato trançado quando esticadas transversalmente, são projetadas para que se ‘abram’ durante o processo de mistura com o solo”. As malhas, no entanto, proporcionam um maior intertravamento com as partículas do solo. Um terceiro tipo é o Texsol, desenvolvido na França. Trata-se de um filamento contínuo que é distribuído aleatoriamente dentro da massa de solo.

As fibras minerais mais conhecidas são as de carbono, amianto e vidro. No entanto, o uso de fibras de amianto na construção civil é proibido em muitos países, pois durante o corte, a fibra libera partículas muito pequenas, denominadas asbestos, que danificam os alvéolos pulmonares quando aspirada pelo homem.

O aço é a fibra metálica mais comum. Entretanto, essa fibra pode apresentar problemas quanto à corrosão dependendo do meio onde são empregadas. Tal problema pode ser resolvido com a aplicação da técnica chamada “banho de níquel” (CASAGRANDE, 2001). A Tabela 2.3 mostra as propriedades de algumas fibras não naturais.

Tabela 2.3: Fibras não naturais - propriedades (adaptado de FIGUEIREDO, 2000).

Tipo de fibra	Diâmetro (mm)	Densidade (kg/dm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5 - 500	7,84	190-210	0,5 - 2,0	0,5 - 3,5
Vidro	9 - 15	2,60	70 - 80	2 - 4	2 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,4	2,60	160 - 200	3 - 3,5	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0,90	5 - 7,7	0,5 - 0,75	8,0
Klevar	10	1,45	65 - 133	3,6	2,1 - 4,0
Carbono	9	1,90	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,10	4	0,9	13 - 15
Celulose	-	1,20	10	0,3 - 0,5	-
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1,0	3,0

No norte do Iraque, as fibras vegetais são utilizadas de diversas maneiras na construção civil desde tempos mais antigos. De acordo com Kadir (1990), madeira, junco, cana e folhas vegetais são usadas no país para a construção de telhados; solo reforçado com feno (compósito de solo-fibra) é utilizado para fabricar adobe e para revestimentos de paredes e coberturas.

Os métodos de extração, os tratamentos e a variedade de espécies geram uma heterogeneidade nas fibras vegetais. Alguns exemplos de fibras vegetais são bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar (Hannant *apud* CASAGRANDE, 2001). A inclusão de fibras no solo controla a retração durante a secagem, melhora a resistência à tração e reduz a densidade, dependendo da técnica construtiva (Walker *et al.*, 2005).

Individualmente, as fibras vegetais também podem ser consideradas como materiais compósitos já que são constituídas por fibras individuais ou microfibras aderidas a um composto orgânico conhecido como lignina, que funciona como um adesivo natural. Sales (2006) expôs que cada uma dessas microfibras é formada por quatro camadas, com diferentes teores de celulose, hemicelulose, lignina e substâncias extrativas. É importante lembrar que as moléculas de celulose são responsáveis pela resistência das fibras.

A seguir, serão detalhadas duas importantes fibras vegetais, o sisal e o cânhamo, empregadas neste trabalho.

2.7.4.1 Fibras de sisal

O cultivo de sisal (*Agave sisalana*) começou com os Maias, no México, antes da chegada dos europeus. De acordo com Ghavami *et al.* (1999), a produção de sisal em grande escala se iniciou em 1888 no México e em seguida as plantações se espalharam por diversas regiões tropicais e sub-tropicais. Os autores ainda ressaltam que até 1999 existiam 57 espécies catalogadas.

Os maiores produtores dessas fibras são Brasil, Indonésia e países do leste africano. No Brasil, os estados mais ricos em sisal são Bahia (BA), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN) e Pernambuco (PE). Na década de 1980, o Brasil produzia em torno de 200.000 t/ano de sisal (TOLEDO FILHO *et al.*, 1990).

As fibras de sisal podem ser classificadas em função do seu comprimento como na Tabela 2.4:

Tabela 2.4: Classificação das fibras em função do comprimento (GHAVAMI *et al.*, 1999).

Classificação	Comprimento (mm)
Fibras curtas	L < 600
Fibras médias	600 < L < 700
Fibras longas	L > 700

O sisal cresce em ambientes tropicais e renova-se rapidamente, encontrando-se disponível a um custo razoável. Esta fibra também possui uma grande resistência mecânica e por isso é uma das fibras vegetais mais utilizadas como reforço de materiais. No entanto, é importante ressaltar que as suas propriedades físicas e mecânicas são muito afetadas pelas mudanças do ambiente, como tipo de solo, momento da colheita, processo de separação das fibras, tratamento utilizado, umidade do ar e temperatura. Sales (2006) apresentou uma tabela com as propriedades das fibras de sisal obtidas por diversos autores (Tabela 2.5).

Tabela 2.5: Propriedades das fibras de sisal (adaptado de SALES, 2006).

Fonte dos dados	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Diâmetro (mm)	Densidade (kg/dm³)
Swamy (1975)	800	-	3	0,01 – 0,05	1,50
Guimarães (1982)	449	14,9	4,3	-	-
CEPED (1982)	458,4	15,2	4,29	0,019	1,27
Chand <i>et al.</i> (1988)	530 - 640	9,4 - 22	3 – 7	0,05 – 0,30	1,45
Aziz <i>et al.</i> (1984)	280 -568	13 -26	3 – 5	-	-
Bentur e Mindess (1990)	800	-	3	0,01 – 0,05	1,50
Satanayarana <i>et al.</i> (1990)	568 - 640	9,4 – 15,8	3 – 7	0,05 – 0,2	1,45
Joseph <i>et al.</i> (1996)	400 - 700	9 - 20	5 – 14	-	-
Toledo Filho (1997)	577,5	19,0	3,0	0,12	0,90
Savastano Jr e Agopyan (1998)	347 - 378	15,2	4,9 – 5,4	-	1,37
Ghavami <i>et al.</i> (1999)	580	18	6	0,15	0,93

Toledo Filho *et al.* (1990) estudaram as propriedades físicas e mecânicas de fibras de sisal produzidas no estado da Paraíba, Brasil. Na média, obteve-se um peso específico de $7,6 \text{ kN/m}^3$ e umidade natural de 14,6%. Para uma fibra de 12 cm de comprimento e 0,13 mm de diâmetro, a resistência à tração foi de 539 MPa e a deformação na ruptura foi de 3,6%. Quando adicionadas aos blocos de adobe, a aplicação de 4% de sisal melhorou o comportamento frágil dos blocos. O estudo também verificou a absorção de água das fibras de sisal, um dos principais problemas do uso de fibras em matriz de terra. Após a secagem ao sol, as fibras foram imersas em água e seu peso foi medido a cada 24 horas, durante 4 dias. Após 48 horas, a absorção de água já era em média de 199%.

2.7.4.2 Fibras de cânhamo

A *Cannabis sativa* é uma planta herbácea da família das Canabiáceas (Cannabaceae), amplamente cultivada em muitas partes do mundo. Historicamente, o plantio de *Cannabis sativa* teve origem na Ásia Central e se espalhou para China, Ásia e Mediterrâneo. Na China, é cultivado desde aproximadamente 5000 a.C. para alimentação, medicamentos e fabricação de roupas, e mais tarde para a fabricação de papel. Na França, o auge dessa cultura ocorreu no século XVIII. Os fios mais bonitos eram lavados e utilizados em lençóis e roupas. Com os resíduos da fabricação das fibras, eram feitos sacos de cozinha. Hoje, a produção francesa constitui 50% da produção européia (22.000 t / ano).

As folhas são finamente recortadas em segmentos lineares e o caule é fibroso. Sua resina possui propriedades psicoativas enquanto as partes não-psycoativas da planta, como as fibras e as sementes, servem de matéria-prima para inúmeros produtos que atualmente são explorados pelas indústrias têxteis, alimentícias, automotivas e construção civil. Em 2005, cerca de 30 países em todo o mundo, entre eles EUA, França, Rússia, Espanha, Suíça, Suécia, Itália, Canadá e Chile, cultivavam e comercializavam produtos à base de cânhamo (YOUNG, 2005).

Em uma seção transversal do caule do cânhamo, nota-se a espessa parede na periferia, formada por fibras que servem para manter o porte da planta durante o seu crescimento. As fibras são a espinha dorsal do caule. Em um caule maduro e seco, elas representam aproximadamente 35% do peso. A partir das fibras de cânhamo podem ser produzidos diversos tipos de materiais, com diferentes propriedades e aplicações, como pode ser visto na Figura 2.28.



Figura 2.28: Diferentes tipos de cânhamo (www.terrachanvre.com Acesso em fev/2010).

2.8 Materiais compósitos fibrosos

Budinski (*apud* CASAGRANDE, 2001) definiu materiais compósitos como uma mistura de dois ou mais materiais diferentes, com características inferiores à do material resultante. Tais materiais são então desenvolvidos para otimizar os pontos fortes de cada uma das fases existentes (matriz e material de reforço).

Os materiais compósitos podem ser classificados em dois grandes grupos, segundo Higgins (*apud* CASAGRANDE, 2001): particulados (quando é feita a adição de material em forma de partícula na matriz) e fibrosos. Neste último caso, as fibras são capazes de distribuir as tensões dentro da matriz uniformemente, aumentando a resistência à tração pelo controle da propagação de fissuras, mas não impedem a formação das mesmas no compósito. O tipo de reforço a ser empregado depende de quais propriedades se pretende obter para o material compósito resultante.

As principais variáveis no comportamento de compósitos reforçados com fibras são o teor e a razão de aspecto da fibra, as propriedades físicas da fibra e da matriz e a aderência entre as duas fases (Hannant *apud* CASAGRANDE, 2001). O efeito da orientação e distribuição das fibras na matriz também deve ser considerado (Johnston *apud* CASAGRANDE, 2001). A habilidade de uma fibra de transmitir forças é influenciada, em grande parte, pela orientação da fibra em relação ao plano de ruptura. O efeito máximo é obtido com uma fibra disposta perpendicularmente ao plano de ruptura; quando a fibra encontra-se paralela a este plano, ela não acrescenta efeito algum ao compósito. Segundo Maher e Gray (*apud* CASAGRANDE, 2001), na maioria dos trabalhos mais recentes, as fibras encontram-se aleatoriamente distribuídas, minimizando assim o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induzindo a planos preferenciais de fraqueza.

Na Figura 2.29, é demonstrada esquematicamente a influência do comprimento das fibras no comportamento final do compósito. As fibras longas são geralmente mais eficientes por apresentarem maior comprimento de ancoragem. Entretanto, o compósito com fibras curtas é mais fácil de ser fabricado. O comprimento das fibras está normalmente relacionado à sua distribuição e posicionamento dentro da matriz: fibras longas costumam ser orientadas em uma direção, com espaçamento pré-determinado; fibras curtas são normalmente distribuídas aleatoriamente. Segundo Agopyan e Savastano Jr (2003), a relação de aspecto (comprimento/diâmetro) das fibras é um fator determinante na transferência de solicitações para a matriz.

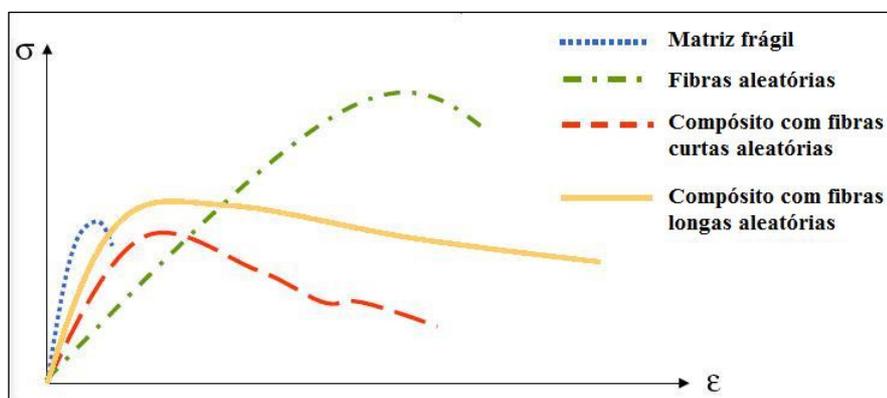


Figura 2.29: Curva tensão-deformação de compósitos com diferentes reforços fibrosos (GHAVAMI, 2008).

Quanto ao módulo de elasticidade, o emprego de fibras de baixo módulo como reforço de matrizes frágeis visa principalmente aumentar a ductilidade do novo material. Com a utilização de uma fibra mais rígida do que a matriz, ocorre um acréscimo de resistência pré-fissuração do compósito.

Os materiais compósitos fibrosos geram maior benefício no estado pós-fissuração, quando as fibras contribuem mais efetivamente à resistência do material aumentando sua capacidade de absorver energia e mantendo as interfaces de fissuras juntas (CASAGRANDE, 2001). No entanto, Sales (2006) ressaltou que quando as fibras são adicionadas em frações volumétricas muito altas, elas tendem a se agrupar e a se enrolar dentro da matriz, diminuindo a aderência e propiciando a redução da resistência mecânica do compósito.

Finalmente, a superfície irregular das fibras vegetais facilita a ancoragem das mesmas junto a matrizes frágeis (AGOPYAN E SAVASTANO JR, 2003). Quanto maior a aderência, maior a resistência mecânica, porém menor é a tenacidade na fratura (SALES, 2006).

2.8.1

Aderência matriz-fibra

O comportamento de um material compósito depende intrinsecamente da interação matriz-reforço.

Na Figura 2.30 (Chawla *apud* SALES, 2006), encontra-se um modelo de ruptura de um compósito fibroso. Primeiramente, o compósito está sob tensão (Figura 2.30a). Em seguida (Figura 2.30b), uma fissura surge na matriz propagando-se na direção normal à interface matriz-fibra, mas é momentaneamente impedida de prosseguir pela presença da fibra. Caso essa interface seja pouco resistente, ocorre um descolamento e deflexão da fissura na direção normal à interface em função do cisalhamento interfacial e da contração lateral da fibra e da matriz provocados pelo estado de tensão aplicado (Figura 2.30c). Após algum tempo, ocorre um aumento da fissura na sua direção principal de crescimento (Figura 2.30d). Finalmente, com crescimento da tensão no compósito, verifica-se que o deslocamento na interface continua e a ruptura da fibra pode ocorrer em algum ponto mais fraco, ao longo de seu comprimento (Figura 2.30e). É importante observar que mesmo as fibras curtas impedem o crescimento inicial da fissura.

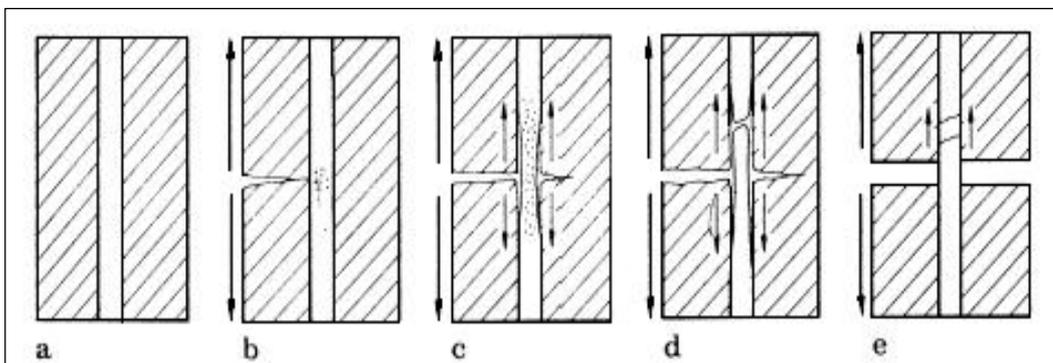


Figura 2.30: Modelo de fissuração do compósito com fibras (Chawla *apud* SALES, 2006).

2.9 Revestimentos

As paredes externas de edifícios estão constantemente expostas às agressões naturais, como os ventos, a ação do sol e particularmente, a ação da chuva. Por isso, quando essas paredes são erguidas com materiais pouco resistentes à penetração de água, é preciso lhes proteger.

A maneira mais antiga e usual de resguardar tais estruturas é a aplicação de revestimentos, que asseguram a impermeabilidade da parede. Após ser molhado pela chuva, ele é capaz de secar sob a ação do vento e do sol. A água contida no revestimento se transforma em vapor que retorna à atmosfera (Figura 2.31). No entanto, para assegurar sua função, o revestimento não pode apresentar fissuras ao longo da sua espessura, pois elas funcionam como um caminho para a penetração da água na parede.

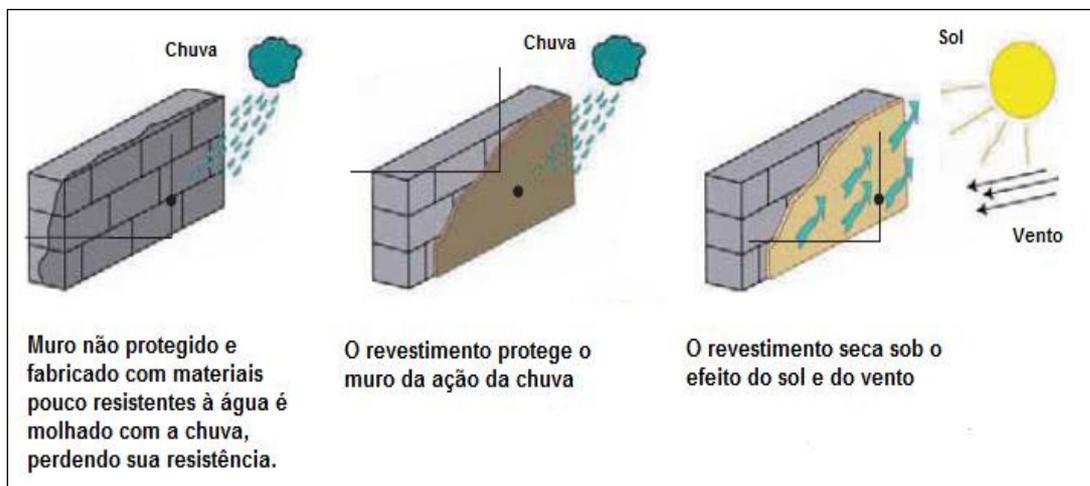


Figura 2.31: Função do revestimento (www.anah.fr Acesso em abr/2010).

Os revestimentos possuem uma função decorativa em função da variedade de cores existentes e efeitos possíveis.

2.9.1 Princípios para aplicação

A aplicação dos revestimentos pode ser feita por lançamento a partir de certa distância do muro ou por deposição, com o auxílio de uma colher de pedreiro. O lançamento manual gera grande variabilidade da resistência de aderência por estar diretamente relacionado à habilidade e conhecimento do responsável pela aplicação.

Em países da África, é comum a aplicação de pequenas esferas de terra sobre o muro. Além de prevenir agressões das intempéries, esse tipo de aplicação também provoca um efeito estético diferente na construção. Na Figura 2.32 observa-se a aplicação de revestimentos de terra sobre um muro no Saara, Argélia.

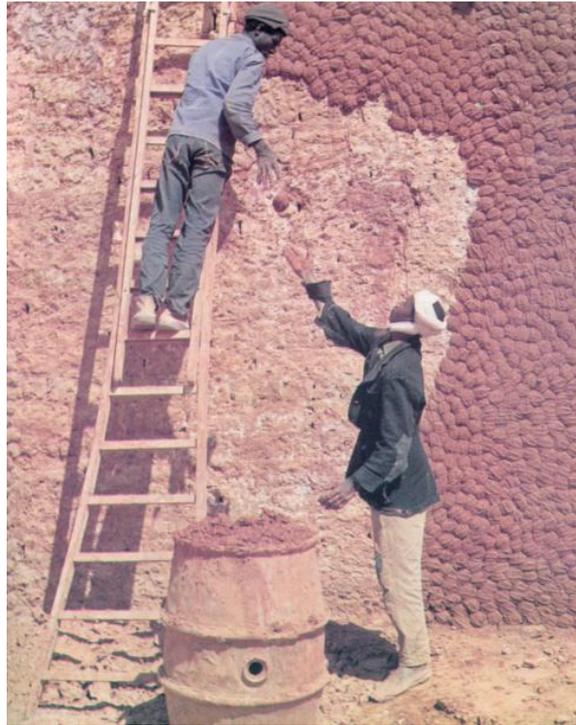


Figura 2.32: Revestimento de terra no Saara, Argélia (DETHIER, 1982).

Para evitar que a água evapore do revestimento muito rapidamente, influenciando no processo de hidratação dos ligantes, não é recomendável a aplicação de revestimento sob altas temperaturas e vento seco. As condições meteorológicas aconselhadas são temperaturas médias (em torno de 20° C), pouco ou nenhum vento, umidade relativa do ar elevada (55%) e, se possível, a aplicação do revestimento na sombra e não sob sol intenso.

Os substratos destinados a receber revestimentos devem ser resistentes, coesos e limpos. A superfície do substrato deve estar livre de qualquer material não aderente. Em substratos de terra crua, é aconselhável que a mesma seja raspada antes da aplicação do revestimento. A fase preliminar de aplicação do revestimento consiste justamente na preparação do substrato e deve ser feita de maneira cuidadosa.

CAPEB (1984) desencoraja a umidificação do substrato em terra crua, pois esta água pode causar a deterioração do mesmo. No entanto, outros autores recomendam um ligeiro umedecimento do substrato pois desta maneira o substrato não absorverá a água contida no revestimento, não comprometendo então a fixação, endurecimento e aderência do mesmo ao substrato (CRATERRE, 1982; JEANNET E PIGNAL, 1993; ÉCOLE D'AVIGNON, 1996).

CRATerre (1982) recomenda que o revestimento consista em pelo menos duas camadas (Figura 2.33). Movendo-se de dentro para fora da estrutura, tais camadas são nomeadas como:

- Camada de fixação: a primeira camada aplicada ao substrato e que garante a aderência do revestimento;
- Corpo do revestimento: a(s) camada(s) intermediária(s) que serve(m) para igualar as desigualdades do substrato. Elas conferem resistência e impermeabilidade ao substrato, permitindo ao mesmo tempo a troca de ar e vapor de água entre o substrato e o ambiente. Essa camada é aplicada após alguns dias de secagem da camada de fixação;

• Camadas de acabamento: selam as possíveis fissuras existentes nas camadas anteriores e dão o aspecto final do revestimento. São as camadas menos espessas. Elas protegem a parede da erosão e a decora, dando-lhe textura e cor.

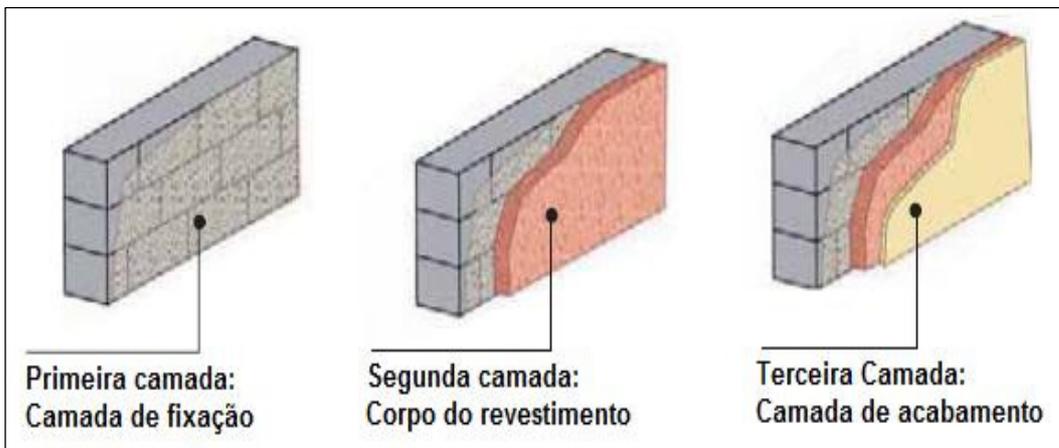


Figura 2.33: Revestimento aplicado em três camadas (www.anah.fr Acesso em abr/2010).

2.9.2 Propriedades dos revestimentos de terra

Em muitos países, especialmente do Oriente Médio e África, onde a construção com terra é abundante, verifica-se uma grande utilização do solo como base para revestimentos (Figura 2.34). Nestes casos, é a argila que funciona como ligante. É importante ressaltar também que os revestimentos de terra são mais econômicos, não geram impactos ambientais e possuem uma excelente permeabilidade em relação ao vapor de água, regulando de maneira mais eficaz a temperatura e a umidade dentro dos ambientes.

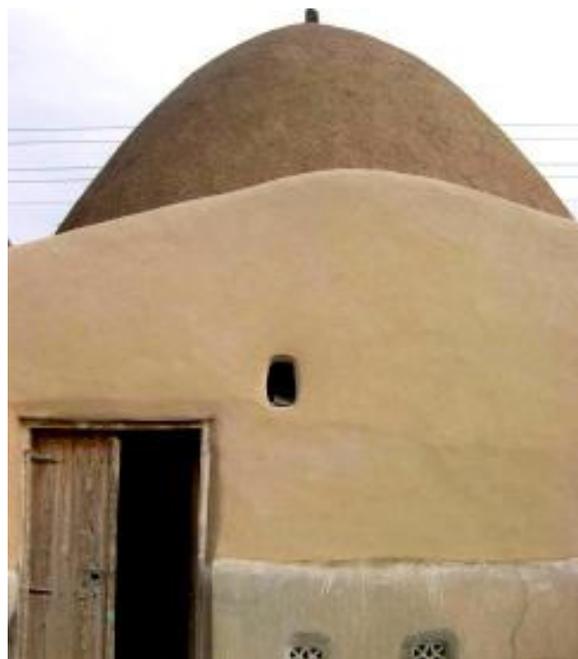


Figura 2.34: Casa com revestimento de terra na Síria (fonte: Projeto MEDA-Corpus).

As propriedades dos revestimentos de terra são influenciadas não só pelas quantidades de argila, areia e silte do solo empregado, como também pelo teor de água, tipo de argila do solo, método de preparação e presença de aditivos. Como indicado pelo CRATerre (2006), o solo deve ser cuidadosamente escolhido de acordo com sua composição, dimensão das partículas e cor. Misturas também podem ser obtidas a partir de pó de terra misturado com areia. A areia empregada nos revestimentos deve ser composta de pelo menos um terço de grãos finos (<0,5 mm) (MCC-FRANCE, 2006a). Recomenda-se que, para o corpo do revestimento, o diâmetro máximo da terra seja de 10 mm; para a camada de finalização, esse valor não deve ultrapassar 1-2 mm.

Em algumas situações, a argila é misturada à cal e/ou fibras vegetais e resíduos animais. Segundo o Projeto MEDA-Corpus, que procura preservar a arquitetura tradicional do Mediterrâneo, quando a cal é misturada à terra, ela desempenha um papel estabilizador ainda mais eficaz quanto maior o teor de argila da terra, melhorando a qualidade do revestimento especialmente em ambientes úmidos. Já a presença de fibras, sejam elas vegetais ou animais, oferece as seguintes vantagens:

- Evita fissuras durante a secagem ao espalhar por toda a superfície do revestimento as tensões devido ao encolhimento da argila;
- Acelera a secagem em função da drenagem de umidade através dos canais das fibras;
- Reduz a densidade e aumenta a resistência à tração.

Além da sua importância estrutural, os revestimentos de terra, em conjunto com outros elementos arquitetônicos, também contribuem para a estética da construção (Figura 2.35).

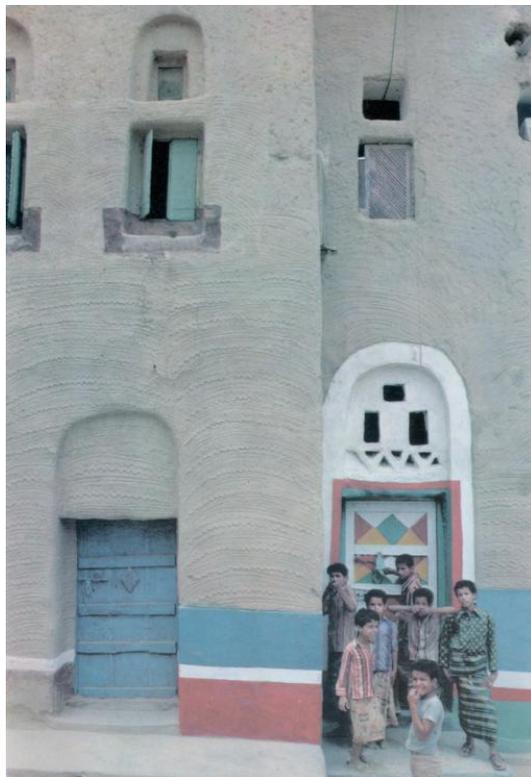


Figura 2.35: Fachada ornamentada em Al Juba, Iêmen (DETHIER, 1982).

2.9.2.1

Utilização em paredes externas e internas

Revestimentos exteriores têm de ser resistentes às intempéries, principalmente à ação da água. Em climas frios, é importante que o revestimento tenha uma baixa resistência à difusão do vapor de água de modo que a água condensada na parede possa ser facilmente transportada para o exterior. O revestimento exterior deve ser mais elástico do que o seu substrato de modo a suportar as influências térmicas e hidráulicas sem fissurar. Em geral, para climas frios, um revestimento de terra externo não é recomendado a menos que ele seja suficientemente protegido. Em climas extremos, com invernos rigorosos com a presença de neve e verões mais quentes, quando a elasticidade de grandes extensões de revestimento liso é insuficiente para lidar com as influências do clima, sulcos verticais e horizontais preenchidos com selantes elásticos são recomendados (MINKE, 2000).

Quanto aos revestimentos internos, mesmo em casos onde ocorram pequenas fissuras, elas podem ser corrigidas com finas camadas de tinta. Se a superfície da parede demandar um revestimento com espessura maior do que 15 mm, ele deve ser aplicado em duas camadas distintas, com a primeira camada contendo mais argila e agregados graúdos do que a segunda. Não é grave se a camada inicial fissurar, pois as fissuras melhoram a adesão da segunda camada (MINKE, 2000).

2.9.2.2

Patologias

Segundo o Projeto MEDA-Corpus, os revestimentos de terra apresentam patologias clássicas de envelhecimento causadas essencialmente pela umidade, chuva, escoamento de água, calor intenso, e ventos; pela preparação deficiente do substrato e do revestimento; e pela falta de manutenção. As patologias citadas mais frequentemente são erosão, fissuras, retração, surgimento de pequenas bolhas, descolamento do substrato e o aparecimento de manchas.

A alternância entre estados secos e úmidos pode fazer variar as dimensões das partículas de argila na interface substrato/revestimento. Assim, se o revestimento é muito rígido, ele se fissa e depois se descola do substrato. O vapor de água também pode se acumular por condensação na interface revestimento/substrato. No entanto, este fenômeno é específico para climas marítimos e temperados, com diferença de pressão de vapor interior e exterior, fazendo com que o vapor migre através da parede.

2.9.2.3

Proteção contra intempéries

Nem sempre é necessário que revestimentos de terra sejam estabilizados para que resistam às intempéries a que são sujeitos. O método mais simples para aumentar a resistência da superfície, especialmente contra a chuva e a erosão do vento, é compactando-a. Isso pode ser feito friccionando uma colher de pedreiro de metal na superfície do revestimento enquanto ele estiver úmido e ligeiramente

plástico. Métodos tradicionais indianos e africanos empregam pedras convexas que são aplicadas com força em movimentos circulares sobre a superfície. Esse tratamento é adequado se a superfície não possuir poros ou fissuras visíveis. Apesar do método não alterar a composição do material, a resistência às intempéries é surpreendentemente elevada com a sua utilização (MINKE, 2000).

A aplicação de pinturas também é utilizada em paredes exteriores, mas elas podem ser erodidas fisicamente pela ação dos ventos, geadas e chuvas ou quimicamente pela ação de raios ultravioletas ou chuvas ácidas, e por isso devem ser periodicamente reaplicadas. Especialmente em climas frios, paredes externas devem ser porosas de modo que permitam a difusão do vapor de água para o exterior. Assim, tintas látex e tintas-dispersão não são recomendadas.

Uma alternativa são os agentes repelentes de água. Trata-se de líquidos transparentes que penetram nos poros do revestimento de terra sem fechá-los, de modo que, enquanto a absorção de água é significativamente reduzida, a difusão de vapor não é. Os seguintes grupos de repelentes podem ser distinguidos: silano ou siloxano, polissiloxanos (resinas de silicone), siliconatos, resinas acrílicas, éster silicato com aditivos hidrofóbicos e silicatos com aditivos hidrofóbicos.

Silanos, siloxanos e resinas de silicone reagem quimicamente com as substâncias minerais do revestimento de terra e são muito resistentes às intempéries. Eles reduzem a absorção de água em 90%, enquanto a difusão do vapor de água é reduzida em somente 5% a 8%. O éster silicato e as resinas acrílicas apresentam as mesmas vantagens com relação à absorção de água, mas reduzem a difusão do vapor de água de 15% a 30%. É importante ressaltar que os efeitos dos produtos repelentes existentes no mercado variam muito em função das diferentes misturas de terra e do clima, e por isso devem ser testados antes do uso (MINKE, 2000).

2.9.3

Revestimentos à base de cal e à base de cimento

Revestimentos de terra para uso em paredes exteriores só funcionam se não possuírem fissuras e forem resistentes à água. Se isto não for possível, a alternativa mais comum é a aplicação de revestimentos à base de cal. Segundo Minke (2000), revestimentos de cal normalmente são compostos por uma parte de cal hidráulica e três a quatro partes de areia.

Já revestimentos à base de cimento não devem ser aplicados pois não suportam elevadas forças térmicas e hidráulicas sem fissurar, permitindo então a penetração de água e causando expansão do material, o que aumenta a fissuração e causa o desprendimento do revestimento em relação ao substrato.

2.9.4

Verificação da aderência ao substrato – Ensaio *pull-off*

O método *pull-off* é um ensaio destrutivo que permite avaliar *in situ* a resistência ao arrancamento dos revestimentos em geral e de pinturas. No entanto, não é aplicável a revestimentos de terra e por isso o método não foi empregado neste trabalho.

Este método apresenta várias vantagens: o aparelho é de fácil utilização pois é leve e portátil; permite obter informação sobre aderência e sobre a sua perda em condições de serviço; os resultados são de fácil interpretação; não necessita de fonte de energia *in situ*; não necessita de trabalho em laboratório. No entanto, a realização do ensaio leva de 1 a 2 dias, além de ser uma técnica destrutiva que afeta a integridade do revestimento. É recomendável pelo menos duas pessoas na sua execução.

A técnica consiste na extração de uma pastilha metálica, com máquina *pull-off*, que é previamente colada ao revestimento através de uma resina epóxica. Para garantir que o arrancamento ocorra apenas sob a área da pastilha, é previamente criado um rasgo no seu contorno, com uma profundidade superior à espessura do revestimento. A máquina de ensaios mede a força necessária para proceder ao arrancamento da pastilha. A relação entre essa força e a área da pastilha corresponde à resistência ao arrancamento, ou seja, à máxima tensão que é possível aplicar ao revestimento.

O arrancamento pode ocorrer por perda de aderência, pela interface entre o revestimento e o substrato (rotura adesiva), por rotura do próprio material de revestimento (rotura coesiva no revestimento) ou do substrato (rotura coesiva do substrato). É frequente a rotura não ocorrer apenas numa destas formas, podendo combinar duas ou mais delas.

2.10 Tipos de construção com terra

Existe uma grande variedade de técnicas de construção com terra, que podem ser divididas em três grandes grupos em função da maneira de se elevarem as paredes: alvenaria, monolítica e mista.

Na alvenaria, elementos individuais (blocos) são unidos entre si através da argamassa. Alguns exemplos são os adobes e os blocos de terra comprimida (Figura 2.36 A). Na técnica monolítica (Figura 2.36 B), as paredes são erguidas com o auxílio de formas sendo a terra compactada entre elas (por exemplo, a taipa-de-pilão e a terra batida). Nas técnicas mistas, a terra funciona como enchimento para uma estrutura que é geralmente de madeira ou bambu. Neste caso, a terra não tem função estrutural, como é o caso da taipa-de-mão (Figura 2.36 C).



Figura 2.36: Modos de uso da terra: A) Alvenaria de blocos de terra comprimida; B) Paredes monolíticas (terra batida); C) Técnica mista (taipa-de-mão) (BARBOSA E GHAVAMI, 2007).

2.10.1 Terra batida (Rammed earth / Pisé)

Durante muitos anos a terra batida foi a técnica mais utilizada de construção com terra em diversos países como Dinamarca, Marrocos, Peru, China, sul da Europa e no norte da África, onde as fortalezas Ksar chegavam a até sete andares. Ainda no século XVIII, J. Rondelet deixou um testemunho da resistência de edifícios em terra batida (MCC-FRANCE, 2006b):

“Quando muralhas de terra batida estão bem feitas, elas podem formar uma peça única, e com um bom revestimento, estas paredes podem durar séculos. Em 1764 fui convidado para restaurar um antigo castelo, no departamento de Ain. Ele havia sido construído com terra batida há mais de 150 anos. As paredes já tinham adquirido dureza. Para ampliar as aberturas, foi necessário o uso de martelos, como para a construção em pedras”.

Na França, esta técnica foi aplicada desde os romanos e lentamente se espalhou por todo o país (Figura 2.37) (MCC-FRANCE, 2006b).



Figura 2.37: Conjunto de habitações sociais em Villefontaine, Isère, França (CITÉ DE SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE, 2009).

François Cointeraux, um arquiteto francês autor de setenta e dois livros sobre a construção com terra, teve seus textos traduzidos e divulgados em todo o mundo, ajudando assim a desenvolver este tipo de construção. Segundo ele, a terra batida não precisa de nenhum apoio por qualquer pedaço de madeira ou qualquer mistura de palha pois, depois de comprimida, ganha consistência e forma uma massa homogênea que pode ser erguida a qualquer altura.

Walker *et al.* (2005) explicam que a técnica consiste em compactar um solo úmido dentro de formas temporárias, em camadas variando entre 100 e 150 mm. De acordo com os autores, a composição ideal do solo é areia e cascalho entre 45 e 80%, silte entre 10% e 30% e, finalmente, argila entre 5% e 20% em peso de solo. O solo ideal não deve ser muito argiloso, porque não compacta bem. A dimensão máxima dos agregados deve ser 6 mm. Todas as matérias orgânicas

devem ser removidas. Tudo deve ser planejado para evitar patologias relacionadas à umidade, principalmente a penetração de água na base e na parte superior.

Tradicionalmente, apiloadores manuais eram utilizados na compactação, mas hoje em dia, máquinas pneumáticas passaram a ser comumente empregadas. Spence e Cook (1983) afirmaram que como o solo não é compactado com as mãos, ele pode estar muito mais seco, com a umidade ótima em torno do limite de plasticidade, diminuindo então a retração. As formas são retiradas logo após a compactação para deixar a parede secar.

Normalmente, as paredes de terra batida possuem entre 300 e 450 mm de espessura, podendo variar conforme as especificações de projeto (WALKER *et al.*, 2005). A densidade das paredes de terra batida tradicionais é de aproximadamente 1,7 e 1,9 t/m³ (BUI, 2008). A velocidade de construção, para uma parede de 300 mm de espessura, é de aproximadamente 5 a 10 m³/dia, para uma equipe de três a quatro trabalhadores.

Em função da sua compactação por camadas, a terra batida possui uma aparência distinta que é um dos atrativos para o emprego da técnica. Para valorizar tal característica, normalmente, as paredes são mantidas sem nenhum revestimento ou pintura.

2.10.2

Taipa (Wattle-and-daub / Torchis)

A taipa é uma técnica construtiva que remonta ao período neolítico. Ela foi empregada na arquitetura de fortificações por diversos povos desde a Idade Antiga, destacando-se a China, que a utilizou em extensos trechos da Muralha da China, e em países islâmicos. A técnica é caracterizada por uma mistura de solo alterado com palha e/ou outras fibras, utilizada como enchimento de um esqueleto de madeira ou de bambu. Tal esqueleto pode variar consideravelmente na sua disposição e na dimensão dos seus elementos, dependendo da técnica empregada.

A taipa de mão, também chamada de pau-a-pique ou barro armado e “à galega” em Portugal, é uma técnica em que as paredes são armadas com madeira ou bambu e preenchidas manualmente com barro e fibra (Figura 2.38 A). Primeiramente, o solo local e água são amassados com os pés e, depois de homogeneizados, as fibras são misturadas. A massa é então usada para preencher a trama. Normalmente, essa técnica é utilizada para erguer paredes estruturais ou de vedação.

A técnica da taipa de pilão, também dita apiloada, consiste em comprimir o solo em formas de madeira no formato de uma grande caixa, onde o material a ser socado é disposto em camadas de aproximadamente 15 cm de altura (Figura 2.38 B). Essas camadas são reduzidas à metade da altura pelo processo de apiloamento. Quando a terra apiloada atinge mais ou menos 2/3 da altura do taipal, recebe, transversalmente, pequenos paus roliços envolvidos em folhas, geralmente de bananeiras, produzindo orifícios cilíndricos denominados "cabodás" que permitem o ancoramento do taipal em nova posição. Essa técnica é usada para formar as paredes externas e as internas, estruturais, sobrecarregadas com pavimento superior ou com madeiramento do telhado.



Figura 2.38: A) Casa de taipa de mão, PE, Brasil (autor: Patrick); B) Casas de taipa de pilão, SP, Brasil (autor: H.T.P. Filho).

Segundo Buyle-Bodin *et al.* (1990), o teor de água de fabricação da mistura de solo e fibras é elevado (variando de 20% a 40% em peso dependendo da técnica de aplicação empregada). A porcentagem em volume de palha em relação ao solo molhado é normalmente de 50%. As fibras podem ser longas ou curtas. Recomenda-se, em seguida, recobrir o muro com um revestimento à base de cal, solo peneirado e adicionado de areia, e fibras animais ou vegetais finas e curtas. Calame (1985) verificou que a taipa apresenta em média um módulo de Young entre 0,2 e 0,3 GPa (permitindo que a estrutura sofra as deformações naturais do esqueleto de madeira).

Como a taipa deve ser fabricada com o solo no estado plástico, as estabilizações mecânicas clássicas por compactação não podem ser aplicadas. A estabilização física é assegurada pela adição de fibras: a taipa é por definição um material estabilizado fisicamente pela presença da palha misturada ao solo, que reduz consideravelmente a fissuração de retração e assegura uma boa resistência à tração. No entanto, a sensibilidade à água continua presente e só pode ser corrigida pela estabilização química.

Alguns vestígios de construções com taipa do século XV, perfeitamente conservados, foram encontrados na região da Picardia, França, provando assim a durabilidade do material. A simplicidade, o baixo custo e resistência, quando a técnica é bem realizada, fazem com que a taipa seja aplicada ainda hoje em diversos tipos de edificações do Brasil, principalmente regiões de climas quentes e secos com baixos índices de pluviosidade. Tradicionalmente no Brasil ela é isolada com cal, em aplicações repetidas com regularidade, podendo ainda ser revestida com pedras.

2.10.3 Adobe (Adobe / Adobe)

Adobe, que vem de Atóbe (árabe), é o nome mais comumente utilizado para blocos secos ao sol, conhecidos desde o período neolítico e moldados a partir de um solo argiloso. Em algumas regiões com grandes variações de temperatura, o adobe garante inércia térmica que minimiza a sensação de alteração climática, tornando o interior das edificações muito fresco. Resistente, é também um material de baixo custo e alta sustentabilidade.

As construções de adobe devem ser executadas sobre fundações de pedra comum, cerca de 60 cm acima do solo, para evitar o contato com a umidade ascendente. Da mesma forma, é importante a construção de coberturas com beirais a fim de proteger as paredes das águas de chuva. Para uma maior durabilidade, as paredes de adobe devem ser revestidas.

É recomendável que as construções com adobe sejam realizadas durante o período da seca, pois o bloco não deve ser exposto à chuva durante o processo de cura, pois o solo dissolve-se facilmente. No entanto, depois da construção coberta, ele resiste sem problema algum, com grande durabilidade.

De acordo com Spence e Cook (1983), para essa aplicação o solo deve possuir uma boa resistência seca conjugada com uma retração não excessiva. Sua porcentagem de silte e de argila não deve ultrapassar 50%. Solos com um maior teor de finos podem ser usados quando misturados com areia.

Antes da inserção do solo, as formas (de aproximadamente 40x20x15 cm) devem ser molhadas ou polvilhadas com areia fina para prevenir adesão. Em seguida, um volume de solo suficiente deve ser arremessado no interior da forma com uma força satisfatória de modo que o solo se espalhe e preencha todos os cantos da mesma. Deixa-se então o bloco secar por dez dias, virando-o a cada dois dias. Originalmente, esses blocos eram fabricados à mão (Figura 2.39). Mais tarde, as máquinas passaram a ser utilizadas dando origem aos Blocos de Terra Comprimida (BTC) que serão tratados a seguir (BUI, 2008).



Figura 2.39: Produção de Blocos de Adobe (autor: Soare).

2.10.4

BTC - Bloco de Terra Comprimida (CEB / BTC)

Conforme explicitado anteriormente, adobes foram os blocos de construção das primeiras civilizações e a terra batida tem uma história de milhares de anos. No entanto, com a utilização da prensa, essas abordagens antigas foram atualizadas para o mundo moderno. Os Blocos de Terra Comprimida (BTC) representam uma forma moderna de aplicação da terra. Essa técnica surgiu nos anos cinquenta, com o desenvolvimento da primeira prensa manual pelo pesquisador colombiano G. Ramires. Essa prensa ficou conhecida como prensa CINVA-RAM, sendo o primeiro nome o do organismo de habitação popular do

Chile onde Ramires trabalhava, como lembram Barbosa e Ghavami (2007). Também segundo os autores, hoje já se encontram também prensas hidráulicas de grande potência que produzem blocos de resistência que pode chegar aos 6 MPa ou mesmo 8 MPa. Assim, através da combinação do molde do adobe e a compactação, o solo levemente umedecido é transformado em BTC (Figura 2.40).



Figura 2.40: BTC (www.wikipedia.com Acesso mar/2010; autor desconhecido).

Há uma enorme variedade de blocos de terra comprimida. Desde os paralelepípedicos aos blocos com furos ou blocos com encaixe. Como é comprimido, o BTC torna-se mais denso, mais regular e com uma maior resistência à compressão do que o bloco de adobe comum. Quando não estabilizados, os blocos saem da prensa com resistência suficiente para uso imediato. A estabilização pode ser feita com cal, cimento, betume, entre outros. A escolha do teor e da natureza do estabilizante é feita em função das condições econômicas e do tipo de argila presente no solo utilizado.

A escolha do solo é determinante na qualidade dos blocos. A construção com BTC tem como princípio utilizar basicamente o solo local, evitando custos associados ao transporte da matéria-prima. No entanto, existem algumas orientações para se prever a qualidade dos blocos resultantes de um determinado solo (P'KLA, 2002):

- o solo não deve ser muito argiloso ($\%2\mu_m < 30\%$) evitando assim as fissuras provenientes de retração, que fragilizam o bloco;
- o material deve assegurar um mínimo de plasticidade e garantir a coesão entre os grãos durante a compactação;
- os grandes elementos do solo não devem ultrapassar um diâmetro médio de 5 mm, dependendo da dimensão dos blocos.

Finalmente, o processo de fabricação dos BTC permite a execução de um número muito razoável de blocos por dia; e a produção pode ser assegurada durante todo o ano, independentemente das condições climáticas. As maiores produções de Blocos de Terra Comprimidos estão sediadas atualmente na Alemanha (grupo Krupp) e na Dinamarca. Uma única prensa mecânica pode produzir entre 800 e 5000 blocos por dia (o suficiente para construir 110 m^2 de paredes de uma edificação).

2.11 Arquitetura climática

A arquitetura das edificações deve ser tal que traga um conforto ambiental para seus habitantes. Cada região do mundo emprega diferentes técnicas, melhor adaptadas ao local e aos padrões culturais da sua população. Em muitos países, as variações climáticas ocorridas ao longo do ano (ou até mesmo em um único dia, como nos desertos), exigem que as construções possuam um bom isolamento térmico, mantendo as pessoas protegidas destas modificações bruscas. A primeira documentação de uma concepção arquitetônica em função do clima data do século IV a.C., na atual Grécia (Kadir, 1990).

Em grande parte das áreas do norte do Iraque, por exemplo, por mais de 6 meses ao ano ocorrem chuvas que variam de médias até grandes tempestades nas regiões montanhosas. Vilas no pé das montanhas permanecem cobertas por neve durante muitos dias no inverno. Em determinadas áreas, a temperatura varia entre -10°C até 45°C no verão. Nessas condições, o teto e as paredes das construções devem oferecer conforto, segurança e bem-estar para os moradores. As estruturas devem, por exemplo, ser capazes de manter os habitantes protegidos do vento e da chuva e prevenir o excesso de frio ou de calor. Kadir (1990) explica que as severas condições climáticas do Iraque exigem paredes pesadas e coberturas construídas com materiais locais disponíveis naquelas áreas como, por exemplo, a terra. As casas são construídas normalmente voltadas para o sul ou sudeste, e assim banhadas pelo sol durante a maior parte do dia. As janelas são normalmente pequenas em área e localizadas nas paredes sul da estrutura. O teto também é planejado para que possa ser usado como recreação ou dormitório durante o período quente do verão.

No Irã, a situação é parecida. Zaimi (2010) explica que as secas, a baixa umidade e a falta de nuvens no céu estão entre as características climáticas do planalto central do país, causando grandes mudanças de temperatura nessas zonas. A arquitetura local é executada com materiais de construção como adobe e barro pois eles possuem uma capacidade térmica adequada. Dependendo da região do país, a arquitetura segue um formato diferente, para amenizar a sensação térmica dos habitantes, melhorando o conforto ambiental, como mostrado por Ghobadian (1994) na Figura 2.41.

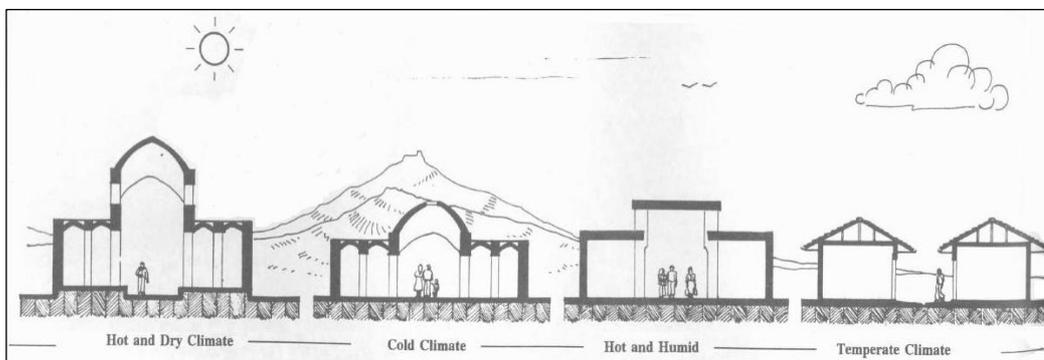


Figura 2.41: Quatro diferentes tipos de construção em quatro diferentes regiões climáticas do Irã (GHOBIAN, 1994).

Os espaços urbanos são muito densos e compactos, e as construções são erguidas próximas umas às outras para que a perda térmica seja menor. As vielas são estreitas, cercadas por muros altos, e sempre possuem um lado com sombra

(Figura 2.42). Se fossem largas, receberiam sol diretamente por longas horas ao dia. Esses becos também auxiliam o fluxo direto dos ventos do deserto. A maioria das vielas no Irã possui “vigas” transversais que, além de aumentar a resistência a terremotos, funcionam como abrigos para os transeuntes.



Figura 2.42: Viela em cidade do Irã (ZAIMI, 2010).

No planalto central do Irã, as casas são projetadas para atender às necessidades climáticas da região, desde a estrutura até a decoração. Os cataventos são as principais características das casas localizadas em regiões quentes do país. A cidade de Yazd é famosa como a “cidade dos cataventos”. Lá está localizado o maior catavento do país, conhecido como Dolatabad Garden, com 34 m de altura (ZAIMI, 2010) (Figura 2.43).

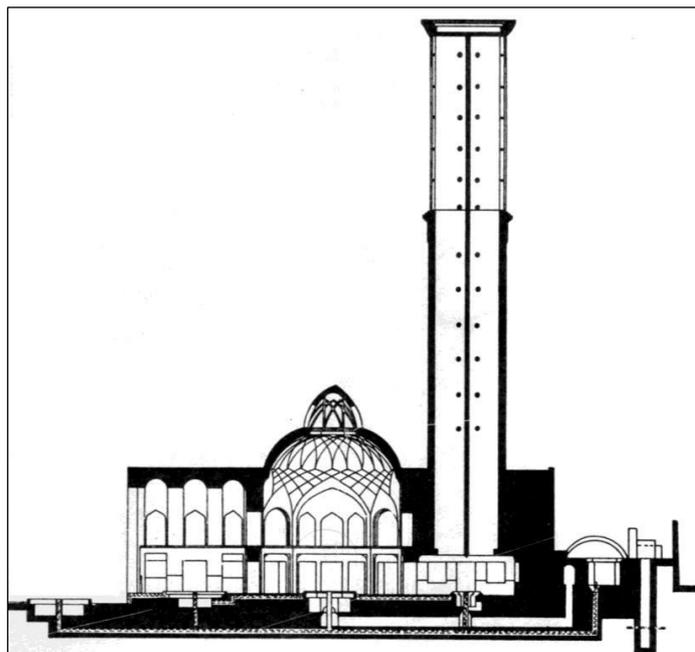


Figura 2.43: Dolatabad Garden, em Yazd, Irã (ZAIMI, 2010).

Como explica A'zami (2005), antigamente no Irã, em função da falta de acesso a equipamentos modernos de aquecimento e/ou resfriamento, os arquitetos dependiam de energias naturais para tornar o interior do edifício mais agradável aos usuários. Sem tecnologia suficiente, somente uma arquitetura inteligente tornava possível as pessoas tolerarem o calor do verão dentro das estruturas. Os cataventos eram então as formas mais eficazes de resfriamento do interior. Eles funcionavam de acordo com a condição de vento e a irradiação solar de cada região.

Os cataventos são como chaminés que transmitem o ar úmido diretamente para os quartos principais, para os reservatórios de água ou para o porão. Existem dois tipos principais de cataventos. A Figura 2.44 A representa o primeiro tipo, que funciona a partir de aberturas localizadas na direção do vento, por onde o ar fresco é obrigado a descer, e aberturas localizadas nas faces contra o vento, por onde o ar quente e poluído sai. Esse é o sistema de tração e sucção do ar. O outro modelo trabalha com a diferença de temperatura (Figura 2.44 B). Durante o dia, já que o sol está voltado para a face sul do catavento, o ar localizado nesta face se aquece e sobe. Isso provoca uma espécie de vácuo no interior do catavento e o ar fresco, da face norte, é puxado para baixo, refrescando o ambiente. Durante a noite, fica frio do lado de fora e o ar se move para dentro do catavento. No interior da construção, esse ar vai aos poucos se esquentando e sobe, indo para o exterior. Esse círculo continua até que as temperaturas das paredes internas e do interior se igualem.

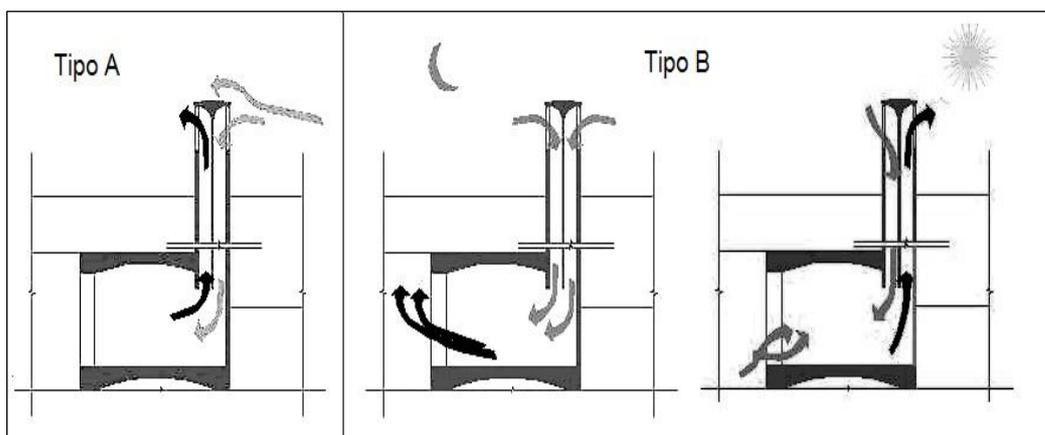


Figura 2.44: Modelos de catavento - A) Através da tração e sucção; B) Através da diferença de temperatura (ZAIMI, 2010).

2.12 Ensaio mecânicos

Existem diversos ensaios para a obtenção das propriedades de engenharia dos materiais empregados na construção civil. Apesar de a terra ter sido utilizada como matéria-prima da construção muito antes dos materiais industrializados, essa técnica construtiva se perdeu ao longo dos séculos e hoje, nos países em desenvolvimento, não há uma normalização vigente para nortear a sua aplicação. Por isso, muitos testes foram adaptados a partir daqueles empregados com o concreto e o aço, por exemplo. Outros foram idealizados em função da realidade vivida no canteiro de obra.

A realização destes ensaios é muito importante uma vez que com tais resultados, o material terra pode ser melhor compreendido e aceito pela sociedade como uma tecnologia viável na construção civil. A necessidade de restauração de algumas estruturas antigas também é uma motivação para o seu entendimento.

2.12.1

Ensaio de consistência (Vicat)

Azeredo e Morel (2009) estudaram a influência da argila na reologia e a trabalhabilidade de argamassas de terra, ainda no estado fresco. A trabalhabilidade foi verificada com o auxílio de um penetrômetro, um equipamento simples que pode ser facilmente empregado no canteiro de obras. Para isso, foram empregados solos de duas regiões na França (Tassin e Magagnosc) e areia de Hostun. Para cada um dos solos, foram fabricados corpos-de-prova de 6%, 9% e 12% de argila em peso seco através da adição da quantidade necessária de areia. A água adicionada a cada uma das misturas era controlada por peso, fazendo com que o teor de água pudesse ser facilmente obtido posteriormente. Foi verificado que a amostra de Tassin 6% era muito arenosa e precisou de um teor de água elevado para que apresentasse uma trabalhabilidade aceitável. Com relação ao solo de Magagnosc, foi observado que o teor de argila ideal para o uso na construção deve estar entre 6% (muito arenoso) e 9% (muito argiloso). Os autores concluíram também que para que o revestimento de terra possua boa trabalhabilidade, a relação entre água e argila deve variar entre 2 e 8.

2.12.2

Ensaio de cisalhamento

Morel *et al.* (2000) estudaram o comportamento de blocos de solo reforçados com fibras de sisal quando submetidos a cisalhamento. No estudo, foi utilizado solo proveniente da região de Lyon (França) e fibras de sisal, com aproximadamente 30 mm de comprimento e $1,04 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ de seção transversal. O teor de fibra era de 0,5% do peso seco do solo. Para a realização do ensaio, os blocos foram posicionados na horizontal e fixados pela extremidade. Em seguida, a carga era aplicada no centro do corpo-de-prova. Foi observado que para os blocos estabilizados com fibras, a curva tensão x deformação de cisalhamento manteve a mesma forma. Além disso, para esses blocos, a ruptura ocorre para uma deformação 0,5 mm maior e, após a ruptura, a tensão diminuiu gradativamente até atingir o mesmo valor dos blocos sem fibras. Como a ruptura ocorre devido a fissuras que se espalham por toda a estrutura, o reforço com fibras é considerado positivo pois ele reduz esse espalhamento.

2.12.3

Ensaio de flexão 3 pontos

A resistência à flexão é de pouca importância para a construção com terra. No entanto, passa a ter certa importância ao julgar a qualidade da argamassa de

terra e a rigidez da borda dos blocos. Ela depende principalmente do teor e do tipo de argila presente no solo.

Ensaio de flexão também foram empregados para analisar a influência das fibras em compósitos, porém com matriz cimentícia. Toledo Filho (1990) verificou o comportamento à flexão de compósitos fabricados com fibras de sisal como reforço de argamassa de cimento. Neste estudo, três diferentes tipos de compósitos foram comparados com uma argamassa frágil, sem fibras: 1) compósitos com diferentes volumes de fibras, mas comprimento de fibras constante; 2) compósitos com volume de fibras constante, mas comprimento de fibras variável; 3) compósitos com volume e comprimento de fibras constante, mas com teor de umidade variável (fibras úmidas ou secas). O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma ASTM C-683, aos 7, 28 e 63 dias. Verificou-se que a resistência à flexão aumenta com o passar dos dias. Deve-se ressaltar também a importância das fibras no comportamento dúctil do compósito, pois em todas as situações testadas, as fibras permitiram o aparecimento de múltiplas fissuras sem que os corpos-de-prova se rompessem.

2.12.4 Retração

É possível analisar a retração linear do material após secagem dentro de uma forma retangular. Após a secagem é medida a variação do comprimento do corpo-de-prova, a partir do comprimento da forma, que é conhecido. Segundo Neves *et al.* (2010), para a fabricação de blocos, esta variação não deve ultrapassar os 20mm de comprimento. Independente da técnica de construção, caso seja feita a estabilização da terra com cimento, são recomendadas as proporções volumétricas apresentadas na Tabela 2.6, em função da medida de retração no teste da caixa:

Tabela 2.6: Relação solo e cimento em função da retração restringida em 4 lados (Cevallos *apud* NEVES *et al.*, 2010)

Retração (em mm)	Cimento (em volume)	Solo (em volume)
Menor que 12	1	18
Entre 12 e 25	1	16
Entre 25 e 38	1	14
Entre 38 e 50	1	12

Para verificar a retração por secagem, Walker e Stace (1997) fabricaram blocos com diferentes teores de argila a partir da mistura de solo argiloso caulínico (LL = 69% e IP = 38%) com areia bem graduada resultando em blocos com 20%, 30%, 40%, 60%, 80% e 90% em massa de argila. O solo e a areia foram misturados mecanicamente por aproximadamente 3 minutos. Em seguida, as amostras foram estabilizadas com 5% e 10% de cimento, em um processo de mistura com duração de 60 s. Depois que a mistura de todos os materiais secos já estava homogeneizada, a água foi adicionada gradualmente até que a consistência apropriada fosse atingida. Finalmente, a mistura úmida foi compactada. Foi observado que a retração de secagem é maior para os maiores teores de argila. Para teores de argila pequenos, a retração por secagem é maior nos blocos estabilizados com 10% de cimento, mas a variação na retração entre os dois teores

de estabilizante é pequena. No entanto, para teores de argila acima de 25%, os blocos estabilizados com 5% de cimento passam a apresentar retrações muito maiores do que aqueles estabilizados com 10% de cimento. Conclui-se então que para altos teores de argila (acima de 25%), o uso de maiores quantidades de cimento é mais eficaz no controle da retração por secagem.

2.13

Considerações finais

A revisão bibliográfica referente uso da terra na construção civil é muito extensa. Como o solo varia muito em função da região e do clima, o conhecimento das suas propriedades é importante para a escolha do solo ideal a ser empregado em determinada técnica construtiva. As técnicas construtivas dividem-se em três classes principais: técnicas de alvenaria, monolíticas e mistas.

Além disso, as variações dimensionais provocadas pela água merecem atenção, pois a retração/expansão altera a resistência do solo. É importante então conhecer as possíveis técnicas estabilizadoras, que minimizam a ação da água e melhoram as características mecânicas do material. A estabilização pode ser realizada por compactação mecânica, por adição de aglutinantes ou impermeabilizantes e, finalmente, por adição de fibras. Uma alternativa, foco deste trabalho, é a aplicação de revestimentos que protegem as paredes externas das intempéries.