Artigo
A construção em terra e a sua ecoeficiência

Rute Eires, CTAC; Jorge Fernandes, ISISE; Adilson Campos Júnior, ISISE; Elisabete Teixeira, ISISE; e Ricardo Mateus, ISISE I Universidade do Minho

Por definição, a palavra ecoeficiência procura combinar eficiência ou eficácia económica e ecológica, no sentido de produzir mais, ao menor preço, com menos recursos, menos resíduos e menos impacto sobre o ambiente [1]. Como tal, verifica-se que a construção em terra poderá cumprir estes pressupostos, dependendo da solução construtiva escolhida e do lugar da obra, nomeadamente em termos de disponibilidade de matéria-prima e do *know-how* da equipa de construção. Pretende-se neste artigo mencionar de que forma pode a construção em terra ser ecoeficiente.

A matéria-prima - terra crua

A principal matéria-prima utilizada na construção em terra é a fração mineral do solo, ou seja, um solo sem matéria orgânica.

Pode dizer-se que a terra é como um betão natural, uma vez que um betão é constituído por agregados de diferentes granulometrias e uma matriz ligante. Também a terra é composta por agregados de diferentes dimensões, gravilhas, areia e silte. Estes, por sua vez, são interligados por um material de características plásticas e ligantes, a argila. As diferenças entre o betão natural terra e o betão convencional residem sobretudo no ligante utilizado, o cimento, mas também no endurecimento e na resistência mecânica [2].

A terra tem claramente menor resistência que o betão convencional e tem um processo de endurecimento diferente. O betão convencional após 28 dias de cura já adquiriu boa parte da resistência final. No entanto, a construção em terra vai ganhando a sua resistência ao longo do tempo, mesmo utilizando um solo não estabilizado, ou seja, sem recurso a cimento, cal ou outro material adicionado. É referido que tal aumento de resistência dever-se-á não só à perda de humidade do solo, mas também a outros fatores que não foram completamente investigados, como as forças eletrostáticas e as eletromagnéticas naturais que atraem as partículas de argila entre si (forças de *Van der Waals*) [3]. Outro processo que ocorre é a cimentação natural que consiste em ligações criadas entre as partículas do solo por ciclos de precipitação e dissolução por meio de "pontes" criadas entre estas. Este mecanismo cria uma maior coesão no solo, que atua de uma forma dinâmica, criando ciclos de maior ou menor atração entre as partículas do solo consoante a quantidade de água [4]. Deste modo, a terra mantém um efeito de sucção entre as partículas controlado pela humidade relativa contida nos poros solo [5] e a coesão é obtida por ligações secas e ligações húmidas.

Pela capacidade de endurecimento ao longo do tempo, a terra, se tiver a composição correta de agregados e argila, formando um solo coesivo (ver Figura 1), pode ser utilizada com sucesso sem estabilizante no interior das habitações (exceto nas zonas húmidas) ou mesmo em paredes revestidas ou protegidas da chuva. Isto porque a limitação do uso de solo não estabilizado consiste na sua fragilidade à ação da chuva, sobretudo nos primeiros anos de vida útil, enquanto não atinge um endurecimento suficiente [2].

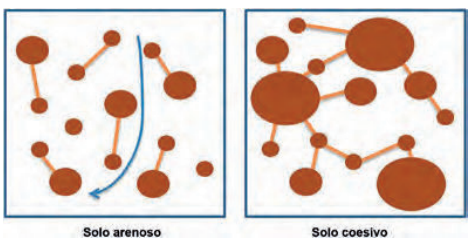


Figura 1. Solo arenoso (mal graduado) e solo coesivo (bem graduado).

A terra como material de construção pode ser utilizada em obras que não exijam uma elevada resistência mecânica ou pode ser associada a outros materiais de construção, como a madeira ou o betão convencional, no sentido de possibilitar construções de maior envergadura. No entanto, ainda existe preconceito, por desconhecimento, sendo considerado por vezes um material pobre e de pouca durabilidade. Contudo, existem inúmeros exemplos de edifícios antigos construídos com terra crua que ainda se encontram de pé e fazem parte do património histórico mundial, como a pirâmide Huaca Pucllana do Peru (Figura 2), um templo pré-inca em forma de pirâmide feita de argila e abobe que serviu como um importante centro cerimonial e administrativo para o avanço da Cultura Lima, uma sociedade que se desenvolveu na costa central do Peru, entre os anos de 200 e 700 d.C. [6].



Figura 2. Huaca Pucllana, Peru. Creditos: Magnus Mundi, 2016 [6].

Este preconceito que já se observava em Portugal na década de 1950, atendendo ao descrito em circular técnica do LNEC [7]:

"(…) Para o caso Português as construções em terra parecem merecer consideração. Recomendam-nas "à priori" o seu baixo preço, a independência de transportes e matérias primas estrangeiras e a simplicidade e não especialização da mão de obra que exige. Mas há, antes, que destruir o preconceito, de certo modo psicológico, que contra a terra como material de construção, geralmente existe, estudando e por ventura melhorando os seus processos de emprego tradicionais, para depois, enobrecido assim o material, o recomendar." *(Gomes e Folque, 1953)*

Todavia, em oposto, também é crescente o número de profissionais que consideram a utilização da terra uma escolha mais sustentável e saudável para o habitat do ser humano. A terra proporciona um ambiente mais salubre e com maior respeito pela natureza. Além disso, tem-se assistido também a uma crescente industrialização dos sistemas construtivos à base de terra ou argila não cozida, proporcionando maior rapidez de execução.

Impacte ambiental

E reconhecido que a produção dos materiais de construção convencionais consome grande quantidade de energia, sobretudo energia não renovável, emite grandes quantidades de CO_2 e por vezes outros compostos poluentes para a atmosfera [8].

O material terra em si, o solo, não requer qualquer gasto energético para ser processado, nem apresenta emissões de CO_2. No entanto, é preciso extrair o solo e transformá-lo em construção ou em produto para a construção. É possível realizar estes passos de forma manual. Contudo, na atualidade, para se obter maior rapidez de construção e maiores resistências utiliza-se a mecanização, o que requer alguma energia. Mesmo assim não tem um impacte ambiental tão significativo, uma vez que na maioria das vezes é usado solo do local de construção.

A utilização da terra em substituição parcial ou total do betão convencional apresenta uma clara vantagem em termos de sustentabilidade, sendo utilizada simples ou estabilizada com cal ou cimento em pequenas percentagens, no caso de se pretender realizar paredes sem reboco ou blocos de terra comprimida. No fim da sua vida útil, a terra sem adição de estabilizante volta à terra sem impacte ambiental, uma vez que é um material natural sem qualquer transformação química. A terra estabilizada em pequenas quantidades também apresentará um impacte ambiental reduzido, sendo possível reciclar (incorporando como material inerte em outras obras) ou voltar à terra desde que se utilizem estabilizantes biodegradáveis ou sem impacte para o solo.

Benefícios para saúde

É referido que quem tem a oportunidade de visitar ou viver em edifícios construídos em terra (na sua totalidade ou com estrutura de madeira e argamassas à base de terra) tem um sentimento de "bem-estar" [9]. Existem várias razões para esta sensação de conforto neste tipo de edifícios, estando entre as razões observadas o excelente comportamento higrotérmico, a regulação de compostos orgânicos voláteis (COV) do ar interior e a proteção face a redes eletromagnéticas.

Um bom comportamento higrotérmico consiste na regulação da temperatura e da humidade no interior dos edifícios e é de suma importância, pois a perceção do conforto térmico depende da temperatura e da humidade em conjunto. A OMS refere limites de conforto térmicos entre os 18 e os 24 ºC e limites de humidade relativa do ar de 30 a 65 % [10]. Fora destes limites o ser humano está sujeito a vários sintomas físicos e podem ocorrer infeções respiratórias ou alergias. A construção em terra tem o benefício de proporcionar, simultaneamente, o controlo da temperatura e da humidade no interior dos edifícios. Esta característica resulta sobretudo da sua boa permeabilidade ao vapor de água que permite que as paredes absorvam e libertem esta humidade, possibilitando o equilíbrio da humidade do ar, evitando condensações e o crescimento de fungos. Segundo um estudo realizado por Eires [2], os valores de permeabilidade ao vapor de água obtidos de amostras de solo compactado (taipa) sem estabilizante e com diferentes tipos de estabilizante são superiores aos valores médios da maioria dos materiais convencionais. Apenas o tijolo maciço apresenta valores semelhantes.

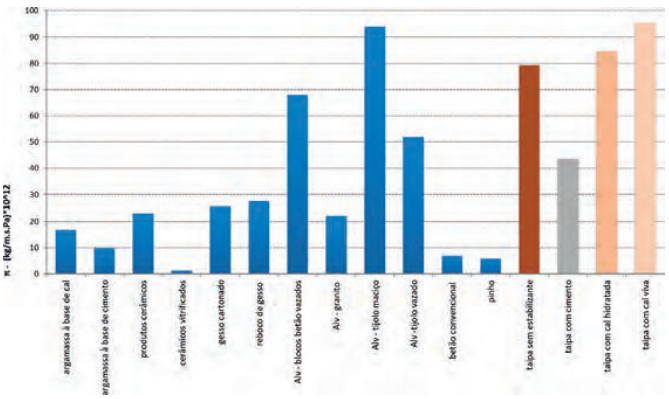


Figura 3. Valores médios de permeabilidade ao vapor de água de vários materiais de construção e taipa sem e com diferentes estabilizantes (Adaptado de Eires [2]).

Os compostos orgânicos voláteis são químicos que se evaporam e circulam no ar, seja no interior ou exterior dos edifícios. Grande parte dos COV provém de materiais de construção e decoração no interior dos edifícios (pinturas, mobílias, carpetes, etc.), bem como do uso de desodorizantes e detergentes no quotidiano, levando a que a concentração de COV no interior seja significativamente superior à do exterior. Isto acontece sobretudo em edifícios construídos recentemente, reabilitados ou redecorados, pois os COV emitidos são mais elevados nos primeiros anos. São exemplo de COV, compostos como o benzeno, tolueno ou formaldeído e na sua maioria são prejudiciais a saúde, sendo muitos deles carcinogéneos. Os sintomas mais comuns referidos pela OMS, são: irritações nos olhos e nariz; dores de cabeça; fadiga, redução da função pulmonar; asma e outros sintomas respiratórios [10].

A construção em terra em si mesma não emite COV, mas é necessário ter prudência na escolha de estabilizantes ou aditivos, bem como na seleção de tintas ou vernizes e/ou revestimentos, preferindo produtos mais naturais e sem emissão de COV. Além disso dever-se-á ter atenção à escolha de mobiliário e decoração interior, assim como nos detergentes utilizados para limpar as superfícies. E como em qualquer edifício deverá ser promovida uma correta renovação do ar interior. Pela elevada porosidade das argilas presentes no solo, a terra poderá também ter um papel regulador de COV, captando materiais poluentes, sobretudo porque a capacidade de adsorção dos materiais poluentes está relacionada com o controlo da humidade [11], e esta é uma capacidade inerente ao material terra, tal como já foi referido. Contudo, são necessários mais estudos para analisar este desempenho e, como tal, é um tema que se encontra neste momento em investigação [11,12,13].

Relativamente aos campos eletromagnéticos, Bueno refere que inúmeros estudos e investigação relacionam a permanência em campos eletromagnéticos, sejam naturais ou artificiais, com a presença de sintomas como mudanças na temperatura da pele ou do corpo, dor nas articulações, fadiga, falta de apetite, *stress* e diminuição de plaquetas no sangue [14]. Os campos artificiais podem ser gerados no interior ou no exterior dos edifícios. Todas as instalações elétricas, eletrodomésticos ou equipamentos elétricos geram campos elétricos e eletromagnéticos, geralmente de baixa frequência, no interior dos edifícios. Contudo, existem também campos eletromagnéticos de alta frequência, produzidos sobretudo fora dos edifícios, como as linhas de alta tensão e redes *wireless*.

Relativamente aos efeitos na saúde, o eletromagnetismo artificial, tal como o natural, em si mesmo pode não ser prejudicial, uma vez que até é utilizado em algumas terapias para curar certas doenças. No entanto, se houver uma elevada intensidade e exposição prolongada, estes campos eletromagnéticos podem causar os sintomas já referidos.

A construção em terra é um material com capacidade de reduzir a passagem destas frequências, dependendo da espessura dos seus elementos, designadamente paredes. Um estudo realizado na Universidade Federal das Forças Armadas de Munique compara a redução proporcionada por diferentes materiais face as altas frequências eletromagnéticas, utilizadas em redes de telecomunicações (2GHz). Este revela que uma parede de adobe de 24 cm de espessura, com massa volúmica de 1600 kg/m^3, gera uma redução de 24 dB enquanto uma parede com espessura idêntica de alvenaria de tijolo furado, com massa volúmica de 1200 kg/m^3, reduz 17dB e uma parede também de 24 cm de blocos silicocalcários de areia/cal reduz apenas 7 dB [15]

A sustentabilidade e ciclo de vida das construções em terra

A indústria da construção é um dos maiores sectores da economia mundial, responsável por quase um terço de todas as emissões de carbono e por utilizar mais energia e matérias-primas/recursos naturais do que qualquer outro sector económico [16]. Adicionalmente, a maioria dos sistemas construtivos convencionais depende de materiais industrializados que têm consideráveis impactes ambientais na sua produção [17,18]. As preocupações ambientais globais e a crescente procura por materiais ecológicos estão a impulsionar o sector para mudar para o paradigma da "sustentabilidade" [19].

Para alcançar este objetivo, é necessário que a indústria da construção adote um modelo circular de gestão de recursos, em que se utiliza recursos da biosfera na devida medida em que o ambiente natural seja capaz de os produzir e num ciclo contínuo de reciclagem>produção>uso>reciclagem em que se evita e reduz a geração de resíduos [20]. Perante a crescente preocupação em adotar uma abordagem mais holística, sustentável e regenerativa, a principal solução para aumentar a sustentabilidade do sector baseia-se na reincorporação de hábitos e técnicas de construção do passado, aprimorando-os com base nos atuais desenvolvimentos científicos e tecnológicos [19].

Neste contexto, após um período de esquecimento devido à industrialização da construção, e à sua conotação com o subdesenvolvimento, renovou-se o interesse pela utilização de materiais naturais na construção, como por exemplo, a terra [19,21]. A terra é considerada um material ecológico, sobretudo devido ao facto de corresponder a um material de aprovisionamento local e reutilizável [19]. No final da sua vida útil, este material pode ser reciclado e usado novamente num novo ciclo de vida. A abundância de matéria-prima e a facilidade de acesso permitem que, até aos dias de hoje, a construção em terra continue a ser uma forma de construção popular, sobretudo em países em desenvolvimento, onde é por vezes considerada a única alternativa viável [22].

A eficiência energética é um parâmetro fundamental na sustentabilidade dos edifícios. Na avaliação do ciclo de vida de um edifício estimam-se os potenciais impactes ambientais relacionados com todas as etapas do ciclo de vida dos produtos [23]. Um dos parâmetros ambientais de maior relevância nesta avaliação é o Potencial de Aquecimento Global, relacionado com as emissões de gases de efeito estufa (GEE), em particular do dióxido de carbono, intimamente relacionado com o consumo de energia operacional, mas também com a energia incorporada nos elementos de construção [24]. A energia incorporada é a quantidade de energia usada para fabricar, transportar, montar e manter os diferentes elementos de construção, desde o berço até o final do ciclo de vida. A energia operacional é a energia usada nos sistemas de aquecimento e arrefecimento, iluminação e na operação dos sistemas integrados do edifício [24].

Para alcançar um ambiente construído neutro em carbono, é necessário otimizar a energia incorporada e operacional [25]. No entanto, atualmente o foco para reduzir o consumo da energia de ciclo de vida do sector de construção está orientado para o aumento da eficiência energética durante a fase de operação. À medida que os edifícios se tornam mais eficientes, aumenta a importância da energia incorporada no balanço energético de ciclo de vida, o que intensifica a necessidade de se encontrar materiais com menor energia incorporada [26] e processos de fabricação mais eficientes.

O método de avaliação do ciclo de vida (ACV) permite avaliar os potenciais impactes ambientais de ciclo de vida e a energia total incorporada de um produto ou serviço. A implementação de um estudo de ACV na etapa de produto é muito importante, pois permite avaliar quais são os processos de maior impacte e verificar o modo com a sua substituição influenciará o desempenho ambiental de ciclo de vida do edifício. Uma forma de comunicar os resultados de uma análise de ACV é desenvolver a Declaração Ambiental do Produto (DAP). As DAP seguem um formato de comunicação *business-to-business,* mas também podem ser utilizadas pelas equipas de projeto, proprietários, promotores e consumidores para apoiar a decisão na escolha de produtos com menor potencial de impacte ambiental [27].

Segundo Mateus *et al.* [28], em Portugal, estima-se que, para um edifício convencional e com uma vida útil de 50 anos, a energia incorporada nos materiais de construção represente cerca de 6-20% da energia total consumida durante o ciclo de vida dos edifícios. Adicionalmente, o estudo realizado por Mota *et al.* [29] mostrou que materiais como revestimentos cerâmicos, betão e tinta são os que mais contribuem para os impactes ambientais incorporados num edifício. Neste contexto, reduzir a energia incorporada nos materiais é uma premissa para reduzir os impactes ambientais e alcançar construções mais eficientes e sustentáveis. Também pode contribuir para diminuir o custo dos materiais e, em particular, do custo do ciclo de vida de um edifício como um todo [26].

As soluções construtivas à base de terra, muito utilizadas em algumas tipologias da construção vernácula portuguesa, são frequentemente reconhecidas como sustentáveis, uma vez que apresentam reduzido impacte ambiental incorporado [19]. Esta característica deve-se essencialmente ao facto de possuírem um processamento de baixa tecnologia e, consequentemente, menor energia incorporada e emissões de CO_2. Adicionalmente, a terra é um material de origem natural, produzido e aplicado localmente, resultando num menor custo de produção [30,31].

De um modo geral, os produtos de construção em terra apresentam maior adaptabilidade às condições climáticas das regiões onde normalmente são utilizados. A sua massa e inércia termo-higroscópica contribuem para a estabilização da temperatura e humidade interior, permite reduzir as necessidades de climatização e consequentemente o uso de energia operacional, resultando em melhorias no desempenho ambiental e económico de uma construção [32]. Salienta-se ainda que os edifícios à base de terra têm grande durabilidade. Há muitos exemplares com centenas de anos, e alguns com vida útil superior a mil anos, ainda em operação. Embora este sistema de construção necessite de alguma manutenção periódica, as intervenções são normalmente de baixo custo [27].

Embora os materiais utilizados neste tipo de construções sejam percecionados como ecológicos, há poucos estudos que permitam comparar de forma quantitativa e equitativa o seu desempenho ambiental com os dos materiais convencionais. Neste sentido, foi desenvolvido em Portugal um estudo [19] que visou determinar o desempenho ambiental de duas técnicas de construção em terra: a taipa, técnica muito utilizada no passado, em especial no Sul do país; e o bloco de terra comprimida (BTC), que poderá ser considerada uma evolução tecnológica dos adobes.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) realizada no referido estudo baseia-se em dados de inventário de ciclo de vida específicos de uma empresa especializada em construção em terra, localizada no Alentejo. Dos resultados obtidos, e numa ACV "do berço ao

portão" de diferentes soluções de parede (considerando os impactes decorrentes da extração de matérias-primas, produção de produtos secundários produzidos por outras empresas, transporte dos materiais até a fábrica e processos de fabricação), o uso de elementos construtivos em terra pode reduzir os potenciais impactes ambientais dos edifícios em cerca de 50% quando comparados com o uso de materiais industrializados (Figura 4) [19]. Isto deve-se, sobretudo, à disponibilidade local da terra enquanto material de construção, o que reduz a necessidade de transporte, e aos processos de produção e construção com reduzida intensidade energética. Adicionalmente, nas etapas de fim-de-vida, os materiais em terra podem ser facilmente reciclados para um novo ciclo com a mesma função, permitindo uma abordagem circular, ou devolvidos ao ambiente com um custo ambiental residual [19].

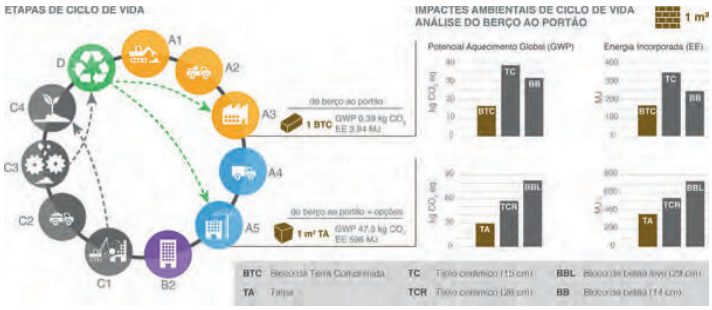


Figura 4. (esquerda) Etapas de Ciclo de Vida dos materiais avaliados, com indicação dos impactes ambientais estimados até à etapa correspondente; (direita) Comparação do desempenho ambiental de 1 m^2 de diferentes tipos de parede nas categorias de Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Energia Incorporada (EE).

Deste modo, para atingir os objetivos de um ambiente construído mais sustentável, a arquitetura e a indústria da construção deverão procurar uma integração otimizada entre tradição e modernidade, conjugando o melhor de ambas a nível do conhecimento, das técnicas e dos materiais. Além das questões ambientais, a promoção da utilização de materiais locais poderá ter um impacte positivo no desenvolvimento social e económico local. Caberá aos projetistas utilizar sua criatividade para melhorar e adaptar essas técnicas vernáculas aos novos requisitos funcionais. No entanto, à escala internacional são necessários mais dados quantitativos acerca do desempenho funcional, durabilidade e contributo das técnicas de construção em terra para a satisfação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

Referências

1. Porto Editora; Ecoeficiência no Dicionário infopédia da Língua Portuguesa. Porto: Porto Editora; Disponível em https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/ecoeficiência [cônsult. 2021-06-09].

2. Eires, R.; Construção em terra: desempenho melhorado com incorporação de biopolímeros; Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2012

3. Maniatidis, Vasilios e Walker, Peter, A Review of Rammed Earth Construction, DTi Partners in Innovation Project 'Developing Rammed Earth for UK Housing', Maio, 2003.

4. Houben, Hugo e Guillaud, Hubert; Earth Construction – A comprehensive guide; Publicado originalmente com o título Traite de construcion en terre de CRATerre por Editions Parenthèse, em 1989; Edição em inglês CRATerre-EAG, Practical Action Publiching, The Schumacher Centre for Technology & Development, 2008.

5. Jaquin, P.A.; Analysis of historic rammed earth construction; tese de doutoramento, Durham University, 2008.

6. Magnus Mundi; Fotografia e texto sobre Huaca Pucllana, Peru; captada em 2016-06-08; Disponível em https://archive.org, em 2021.

7. Gomes, Ruy José e Folque, José de Brito; Circular de informação técnica – O uso da terra com material de construção, C.I.T Nº9, Série D-4; LNEC, 1953.

8. Sabnis, Ajit; Mysore, Pranesh e Anant, Shashi; Construction Materials - Embodied Energy Footprint - Global Warming, Interaction; Structural Engineers World Congress, Conference Paper, October, Singapore 2015.

9. Stephen Dobson; Terra 2000 continuity of tradition: new earth building; keynote speech em Terra 2000 Conference, Torquay, England Maio, 2000.

10. 168. WHO - World Health Organization; Planos Locais de Ação em Habitação e Saúde - Manual para projetos; Editado em Inglês sob o título: Local Housing and Health Action Plans, 2007; publicado pela Direcção-Geral da Saúde, 2008.

11. Shih, Yang-hsin e Chou, Shih-min; Characterization of Adsorption Mechanisms of Volatile Organic Compounds with Montmorillonite at Different Levels of Relative Humidity via a Linear Solvation Energy Relationship Approach; Journal of Chemical & Engineering Data; doi: 10.1021/je1007247. 2010/12/09.

12. Andrea Cunha Martins; Revestimento à base de argila e carbono ativado; Dissertação de Mestrado; Mestrado Integrado em Engenharia Civil; Universidade do Minho; Novembro de 2019.

13. Gomes, Maria Idália; Faria, Paulina e Gomes, João; Melhoria da qualidade do ar interior através da utilização de argamassas ecoeficientes; Capítulo 4, Discussões Efetivas sobre a Sustentabilidade; Organizadores Clécio Danilo Dias da Silva, Daniele Bezerra dos Santos. – Ponta Grossa - PR: Atena Editora, 2021.

14. Bueno, Mariano; O grande livro da casa saudável; Edição original em 1992 intitulada El Gran Libro da Casa Sana, traduzido e editado por Editora Roca Ltda. Brasil, 1995.

15. Minke, Gernot; Building with earth – 30 years of research and development at the university of Kassel; CESB 07 PRAGUE Conference, Session T1A, 2007.

16. Berge, B. The Ecology of Building Materials; 2nd ed.; Elsevier: Oxford, 2009; ISBN 9781856175371.

17. Cabeza, L.F.; Barreneche, C.; Miró, L.; Morera, J.M.; Bartolí, E.; Inés Fernández, A. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2013, 23, 536–542.

18. Fernandes, J.; Mateus, R.; Bragança, L. The contribute of using vernacular materials and techniques for sustainable design. In Proceedings of the International Conference on Vernacular Heritage and Earthen Architecture: CIAV2013 | 7ATP | VerSus; CRC Press / Balkema: Vila Nova da Cerveira, Portugal, 2013.

19. Fernandes, J.; Peixoto, M.; Mateus, R.; Gervásio, H. Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. J. Clean. Prod. 2019, 241.

20. Wadel, G.; Avellaneda, J.; Cuchí, A. La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. Inf. la Construcción 2010, 62, 37–51.

21. Jayasinghe, C.; Fonseka, W.M.C.D.J.; Abeygunawardhene, Y.M. Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. Constr. Build. Mater. 2016, 102, 471–477.

22. Jalali, S.; Eires, R. Inovações científicas de construção em terra crua. Conferência Int. - Angola Ensino, Investig. e Desenvolv. 2008, 7.

23. Ingrao, C.; Messineo, A.; Beltramo, R.; Yigitcanlar, T.; Ioppolo, G. How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. 2018, 201, 556–569.

24. Stephan, A.; Stephan, L. Life cycle energy and cost analysis of embodied, operational and user-transport energy reduction measures for residential buildings. Appl. Energy 2016, 161, 445–464.

25. Dixit, M.K. Life cycle recurrent embodied energy calculation of buildings: A review. J. Clean. Prod. 2019, 209, 731–754.

26. Ramesh, S. Appraisal of Vernacular Building Materials and Alternative Technologies for Roofing and Terracing Options of Embodied Energy in Buildings. Energy Procedia 2012, 14, 1843–1848.

27. Mateus, R.; Fernandes, J.; Teixeira, E.R. Environmental Life Cycle Analysis of Earthen Building Materials. Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng. 2019.

28. Mateus, R.; Silva, S.; Bragança, L.; Almeida, M.; Silva, P. Sustainability Assessment of an Energy Efficient Optimized Solution. In Proceedings of the 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century; Santamouris, M., Wouters, P., Eds.; Heliotopos Conferences: Heliotopos, 2007; pp. 636–640.

29. Mota, L.; Mateus, R.; Bragança, L. The contribution of the maintenance phase for the environmental life-cycle impacts of a residential building. In Proceedings of the BSA 2012: 1st International Conference on Building Sustainability Assessment; Amoêda, R., Mateus, R., Bragança, L., Pinheiro, C., Eds.; Greenlines Institute for Sustainable Development: Porto, 2012; pp. 603–612.

30. Ruiz, G.; Zhang, X.; Edris, W.F.; Cañas, I.; Garijo, L. A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks. Constr. Build. Mater. 2018, 176, 566–572.

31. Mansour, M. Ben; Jelidi, A.; Cherif, A.S.; Jabrallah, S. Ben Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). Constr. Build. Mater. 2016, 104, 44–51.

32. Fernandes, J.; Mateus, R.; Gervásio, H.; Silva, S.M.; Bragança, L. Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance. Renew. Energy 2019, 142, 345–363.

