

Avaliação do Ciclo de Vida da Arquitetura com Terra: Uma Revisão Sistemática da Literatura

Evaluación del Ciclo de Vida en la Arquitectura con Tierra

Sessão Temática: ST04 – Ambiente construído, tecnologia e sustentabilidade

CARVALHO, Beatriz; Doutoranda; PROARQ-FAU/UFRJ

beatriz.carvalho@fau.ufrj.br

SILVOSO, Marcos Martinez; Doutor; PROARQ-FAU/UFRJ

silvoso@fau.ufrj.br

Resumo

A energia incorporada de um edifício convencional corresponde de 6% a 20% da energia total consumida durante o seu ciclo de vida. Os materiais e técnicas alternativas podem reduzir significativamente sua energia incorporada. Os materiais de construção como a terra e as técnicas construtivas como blocos de terra comprimida (BTC) se destacam pois, apresentam inúmeras vantagens. O objetivo desse artigo é reunir a produção científica que versa sobre a avaliação do ciclo de vida (ACV) na produção da arquitetura com terra. Foi realizada uma análise bibliométrica da produção científica indexada na Scopus, nos últimos 20 anos. Foram encontrados 40 artigos, dos quais 5 foram selecionados e discutidos. O estudo da ACV contribui significativamente para o entendimento de que as técnicas e sistemas construtivos com terra assumem um papel de extrema relevância dentro do contexto do desenvolvimento sustentável, já que, foi possível verificar que, essas técnicas apresentam um melhor desempenho ambiental quando comparado com as técnicas tradicionais.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida, arquitetura com terra, revisão sistemática

Abstract

The embodied energy of a conventional building corresponds to 6% to 20% of the total energy consumed during its life cycle. The alternative materials and techniques could significantly reduce its embedded energy. Building materials such as earth and construction techniques such as compressed earth blocks (CEB) stand out because they have numerous advantages. The aim of this article is to gather the scientific production that deals with the life cycle assessment (LCA) in earthen architecture. It was performed a bibliometric analysis of the scientific production indexed in Scopus in the last 20 years. Forty articles were found, of which

5 were selected and discussed. The LCA study contributes significantly to the understanding that earth construction techniques and systems play an extremely important role within the context of sustainable development, since it was possible to verify that these techniques present a better environmental performance when compared to traditional techniques.

Keywords: life cycle assessment, earthen architecture, systematic review

1. Introdução

A indústria da construção civil exerce um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico, se tornando o setor responsável por diversas atividades que geram impactos ambientais significativos. De acordo com o relatório publicado pela UNEP (2021), a construção civil está no caminho para alcançar a meta de descarbonização até 2050. No entanto, este é um resultado temporário que reflete as mudanças ocorridas no setor durante o período da pandemia. Em decorrência disso, muito embora haja progresso no setor, principalmente com relação a eficiência energética e a descarbonização das construções, é de se esperar que haja um retrocesso desses resultados, a menos que os esforços do setor de construção aumentem significativamente (UNEP, 2021).

Apesar desses resultados “falsos positivos”, como o próprio relatório aborda, é possível verificar que o índice de descarbonização dos edifícios, desde 2019, tem sofrido alguma evolução. Houve, de fato, um aumento de 13,9% nas certificações de construção ecológicas além dos investimentos em eficiência energética que aumentaram 11%. No entanto, essas melhorias ainda não contribuem o suficiente para o objetivo de diminuir o impacto ambiental das edificações e da indústria da construção (UNEP, 2021). O cenário descrito reflete a urgente necessidade de encontrar novos modelos de construção que impulsionem, de forma significativa, a redução dos principais problemas relacionados a construção civil tais como o consumo de energia para a produção de insumos, a extração de matérias-primas, a geração e o descarte incorreto dos resíduos sólidos.

O recente relatório do German Sustainable Building Council (DGNB), intitulado Building for a better world (DGNB, 2020) procura fornecer aos proprietários de edifícios, arquitetos, e profissionais tomadores de decisão relacionados ao setor da construção civil, uma melhor compreensão acerca desafios globais que se apresentam a partir dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Além disso, procura encorajar todos a pensarem mais ativamente sobre o impacto dessas metas nas áreas em que cada profissional pode influenciar. De acordo com o relatório UNEP (2021), o World Green Building Council ampliou seu compromisso com as Edificações Zero-Carbono, passando a incluir, em suas pautas, as discussões referentes ao impacto ambiental das edificações considerando todo o ciclo de vida das edificações e não apenas as fases de uso e operação. Dessa forma, as discussões sobre o impacto ambiental do carbono incorporado tornam-se relevantes, sendo necessário que o setor da construção civil comece a trabalhar para compensar os seus impactos totais de carbono incorporado.

O termo “carbono incorporado” está relacionado ao impacto de todas as emissões de carbono que são vinculadas a um material ao longo de seu ciclo de vida. A maioria do carbono incorporado atrelado às edificações são provenientes da fase do produto, em função do impacto ambiental provocado pela cadeia produtiva dos materiais de construção. As emissões relativas à fase do produto são consideradas emissões imediatas e irreversíveis pois seus impactos não podem ser mitigados durante a vida dos edifícios (UNEP, 2021), diferentemente do que ocorre com o “carbono operacional” que é emitido pelo funcionamento anual do edifício relacionado, principalmente, com o consumo de eletricidade, aquecimento/resfriamento, por exemplo.

Conhecer e quantificar o carbono incorporado de um determinado material de construção auxilia os arquitetos e outros profissionais da construção civil, em suas escolhas acerca dos materiais e processos construtivos mais conscientes. É sempre importante levar em consideração o contexto da construção pois um mesmo material em diferentes contextos, apresentam diferentes quantidades de carbono incorporado. Para uma melhor quantificação desses dados são necessários novos procedimentos de análise para auxiliar os profissionais em suas tomadas de decisão, já que as determinações técnicas exigem novos parâmetros e ferramentas baseadas em uma análise qualitativa e não mais quantitativa (CARVALHO, 2018). Compreende-se a necessidade de aplicação do método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para a quantificação dos impactos ambientais dos produtos ou sistemas da construção ao longo de sua vida útil (CALDAS, LIRA e SPOSTO, 2017).

Segundo a NBR ISO 14.040 (ABNT, 2014) a ACV é uma metodologia que propõe avaliação de um produto ou processo durante o seu ciclo de vida, quantificando e analisando os potenciais impactos ambientais. Essa metodologia vem sendo apontada como uma das ferramentas mais utilizadas internacionalmente, nos últimos anos, podendo ser aplicada inclusive aos produtos ou processos no âmbito da construção civil (CALDAS, LIRA e SPOSTO, 2017). A implementação de um estudo de ACV na fase do produto é muito importante, porque permite avaliar quais são os processos que geram um maior impacto e permite compreender em que medidas as mudanças propostas podem contribuir para melhorar o desempenho ambiental da edificação ou do produto (MATEUS, FERNANDES e TEIXEIRA, 2019).

De acordo com Mateus et al. (2007), estima-se que em um edifício convencional, com uma vida útil estimada de 50 anos, a energia incorporada desses materiais de construção corresponde de 6% a 20% da energia total consumida durante o seu ciclo de vida. Nesse sentido, o uso de materiais e técnicas alternativas podem reduzir significativamente a energia incorporada de um edifício bem como seus impactos ambientais.

Torna-se evidente que a arquitetura tem um papel importante no cumprimento das metas dos ODS, pois conforme relatam Agopyan e John (2011) o crescimento da sustentabilidade no setor da construção civil depende de soluções em diversos níveis, que devem ser articuladas dentro de uma visão sistêmica, sendo a arquitetura, a ciência capaz de atribuir essa qualidade

a todo o processo. A escolha por materiais e técnica construtivas não convencionais representa um caminho favorável dentro do contexto do desenvolvimento sustentável.

Desse modo, os materiais de construção como a terra e as técnicas construtivas como adobe, taipa, pau-a-pique, os blocos de terra comprimida, entre outras, se tornam protagonistas nesse contexto, pois, apresentam inúmeras vantagens ambientais. De acordo com Minke (2015), a terra é um material que apresenta uma boa capacidade de armazenamento térmico apresentando eficácia energética em todos os climas, possui capacidade de regular a umidade do ambiente construído pois a terra consegue absorver a umidade em excesso presente no ar, além de apresenta uma boa reversibilidade e possibilita a economia de água e energia nos processos construtivos. Cabe destacar que, as vantagens da construção com terra, não se limitam aos aspectos ambientais, já que apresentam, inclusive, vantagens econômicas e sociais, como é apresentado por Carvalho (2019) quando discorre sobre importância das técnicas de construção com terra nos processos participativos e apresenta a experiência do arquiteto Hassan Fathy o qual buscou trabalhar em modelo de produção participava no qual, os camponeses eram os principais agentes na elaboração do projeto de arquitetura de suas casas. Dentre as diferentes técnicas construtivas com terra, destaca-se o bloco de terra comprimida (BTC) pela facilidade de ser incorporados em modelos de produção participativa por conta da simplicidade de produção e por possui normatização técnica o que facilita sua adoção em projetos de habitação de interesse social (HIS).

A utilização da terra como material de construção é uma das práticas mais antigas da humanidade e faz parte da cultura construtiva de diversas civilizações. De acordo com Houben e Guillaud (2006), os primeiros exemplares começaram a surgir na Ásia e África, de onde se difundiram para os demais continentes. Tendo isso em vista, a UNESCO, em 2007, formulou o “World Heritage Earthen Architecture Programme” (UNESCO, 2017) que visa a conservação e gestão de construções e regiões construídas com terra e já declarou a existência de 149 construções como patrimônio mundial, que estão divididas em cinco regiões, a saber: (a) Ásia e Pacífico com 49 exemplares, (b) América Latina com 39, (c) Estados Árabes com 26, Europa e América do Norte com 20 e (d) África com 15.

A América Latina é umas das regiões com um expressivo número de construções com terra preservadas pela UNESCO, demonstrando assim, a importância dessas práticas construtivas para o contexto cultural da região. A criação da Rede Ibero-Americana de Arquitetura e Construção com Terra (PROTERRA), confirma a importância que a construção com terra tem para a América Latina pois reúne especialistas de diferentes países que promovem ações para o desenvolvimento da arquitetura e a construção com terra (PROTERRA, 2022).

A despeito da relevância da arquitetura com terra no contexto do desenvolvimento sustentável, é legítimo afirmar que ainda são poucas as pesquisas direcionadas ao estudo e aplicação da metodologia de ACV na produção da arquitetura com terra. Assim como coloca Ben-Alon (2019), embora a construção em terra tenha sido extensivamente discutida como

sendo uma alternativa construtiva que apresenta um melhor desempenho ambiental, um número pouco expressivo de estudos examinou rigorosamente seus impactos ambientais.

Posto isso, o objetivo desse artigo é reunir e discutir a produção científica que se ocupa da aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida na produção da arquitetura com terra, dando ênfase para os artigos que abordam o sistema construtivo dos blocos de terra comprimida.

2. Metodologia

Foi adotado como método de pesquisa a análise bibliométrica que objetiva avaliar quantitativamente a produção científica para um determinado contexto, possibilitando a identificação de crescimento da produção ou a dispersão de alguns campos científicos no decorrer dos anos, dos autores e instituições mais produtivos, das revistas científicas mais relevantes para determinadas áreas do conhecimento, entre outros dados. Ressalta-se que o estudo bibliométrico pode fornecer dois tipos de dados: (a) os dados indexados referentes às publicações selecionadas que as contextualizam dentro do cenário de busca e (b) o texto das publicações propriamente dito que traz o conteúdo científico de fato.

Para essa revisão sistemática foram considerados tanto os dados indexados como os textos científicos da produção científica internacional pautados em artigos publicados em periódicos, anais de congressos e capítulos de livros indexados na base de dados Scopus, para um intervalo temporal de 20 anos (2002 até 2022). Considerando que esse trabalho se limita ao estudo da produção científica que se ocupa da aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida na produção arquitetônica com terra, foi adotado como critério de seleção os artigos científicos que apresentavam no título, no resumo ou nas palavras-chave os termos “Life Cycle Assessment” e “Earthen Architecture” e suas variações.

Cabe aqui ressaltar algumas observações acerca dos critérios utilizado para a seleção dos artigos. Optou-se pela utilização dos termos em inglês pois, por se tratar de uma base de dados internacional, apresentou uma maior abrangência nos resultados. Quando os termos “Life Cycle Assessment” e “Earthen Architecture” foram utilizados como termos de busca, a base de dados identificou apenas três artigos. Fica claro que formulação de uma string de busca apenas com esses dois termos, limita a pesquisa, pois existem diferentes termos que se referem a uma mesma área temática. Por outro lado, utilização de muitos termos de busca, não garante a abrangência dos resultados.

Portanto, foi necessário investigar as novas palavras-chaves e quais delas seriam utilizadas na busca. O primeiro passo foi pesquisar, separadamente, pelo termo “Life Cycle Assessment” e depois “Earthen Architecture”. A base de dados do Scopus possibilita a identificação todas as palavras-chaves que aparecem relacionadas ao termo buscado e, com isso, foi possível

indicar sete palavras-chave para o primeiro termo e nove para o segundo, conforme é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Palavras-chaves relacionadas a ACV e Arquitetura com terra

Palavra-chave 1	Variações	Palavra-chave 2	Variações
Avaliação do Ciclo de Vida	<ol style="list-style-type: none"> 1. life cycle analysis 2. life cycle assessment 3. life cycle assessment (lca) 4. life cycle inventory 5. life-cycle assessment 6. life-cycle assessment (lca) 7. LCA 	Arquitetura com Terra	<ol style="list-style-type: none"> 1. earthen architecture 2. earthen construction 3. earthen building materials 4. compressed earth blocks 5. CEB 6. adobe 7. rammed earth 8. vernacular architecture 9. earth-based building materials

Fonte: Autora (2022)

Conforme já foi dito anteriormente, utilização de muitos termos de busca, não garante a abrangência dos resultados, então foi necessário escolher quais dessas palavras-chaves seriam incluídas na *string* de busca final. Para isso, foram realizadas novas buscas, combinando os termos encontrados, conforme é apresentado no Quadro 2. Optou-se pela investigação dos 40 artigos encontrados com a pesquisa 6.

Quadro 2: *Strings* de Busca

	<i>Strings</i> de busca	Resultados
Pesquisa 1	"life cycle assessment"	32.425
Pesquisa 2	("life cycle analysis" OR "life cycle assessment" OR "life cycle assessment (lca)" OR "life cycle inventory" OR "life-cycle assessment" OR "life-cycle assessment (lca)" OR "LCA")	52.455
Pesquisa 3	("life cycle analysis" OR "life cycle assessment" OR "life cycle inventory" OR "LCA")	52.455
Pesquisa 4	"earthen architecture"	333
Pesquisa 5	("life cycle analysis" OR "life cycle assessment" OR "life cycle inventory" OR "lca") AND ("earthen architecture" OR "earthen construction" OR "earthen building materials" OR "Compressed earth blocks" OR "Vernacular Architecture" OR "rammed earth" OR "adobe" OR "ceb" OR "earth-based building materials")	10.855
Pesquisa 6	("life cycle analysis" OR "life cycle assessment" OR "life cycle inventory" OR "lca") AND ("earthen architecture" OR "earthen construction" OR "earthen building materials" OR "Compressed earth blocks" OR "Vernacular Architecture" OR "rammed earth" OR "adobe" OR "ceb")	40

Fonte: Autora, 2022.

3. Resultados

A partir da pesquisa realizada em julho de 2022, na base de dados Scopus, utilizando a seguinte string de busca ("*life cycle analysis*" OR "*life cycle assessment*" OR "*life cycle inventory*" OR "*lca*") AND ("*earthen architecture*" OR "*earthen construction*" OR "*earthen building materials*" OR "*Compressed earth blocks*" OR "*Vernacular Architecture*" OR "*rammed earth*" OR "*adobe*" OR "*ceb*") foram identificados um total de 40 artigos nos últimos 10 anos, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 1: Artigos sobre ACV e Arquitetura com Terra



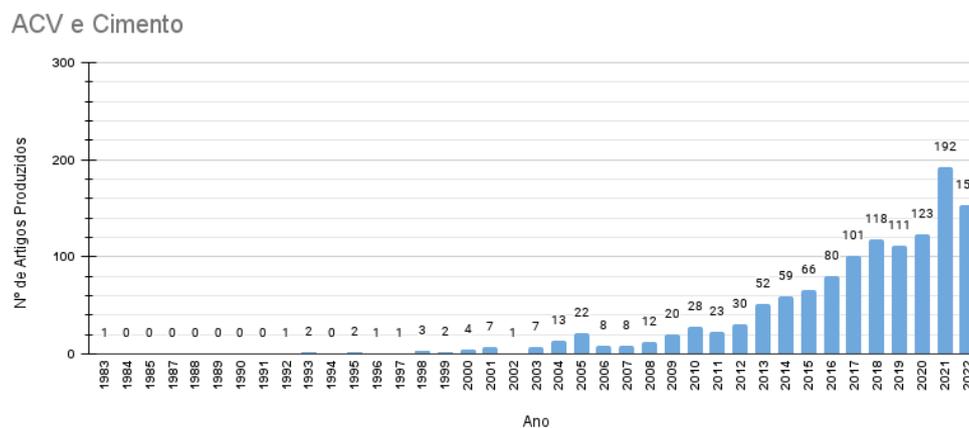
Fonte: Autora, 2022.

Observa-se que as duas primeiras publicações disponíveis na base Scopus são de 2012, de autoria de Serrano et. al. (2012) e Jenkins Swan, Rteil e Lovegrove (2012). Serrano et. al. (2012) se debruça sobre impacto ambiental relacionado a incorporação de materiais de mudança de fase no taipa de pilão, enquanto que Jenkins Swan, Rteil e Lovegrove (2012) focam em uma comparação do impacto ambiental dos sistema construtivo do BTC e das estruturas de madeira. Ambas as publicações além de abordarem a avaliação do impacto ambiental da terra enquanto material de construção, também se concentram em discutir outros parâmetros como o desempenho mecânico, desempenho térmico e os custos financeiros necessário para incorporar esses materiais em uma construção.

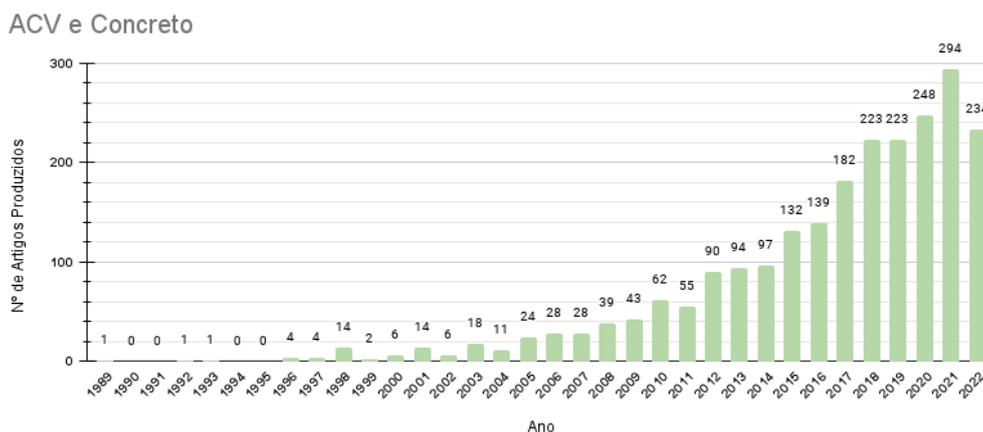
O destaque a esses trabalhos acontece porque, apesar de terem sido publicadas há 10 anos, são consideradas estudos recentes quando comparados a outros que também versam sobre ACV mas que abordam materiais convencionais como o concreto e cimento, por exemplo. A Figura 2 apresenta os resultados encontrados para duas buscas realizadas na base Scopus que identificam os artigos que versam sobre ACV e cimento e ACV e concreto. Nota-se que o interesse pela investigação sobre o impacto ambiental dos materiais convencionais não é tão

recente como são as investigações sobre a terra. Acredita-se que as discussões sobre o desenvolvimento sustentável e a necessidade de se buscar processos e materiais construtivos menos danosos ao meio ambiente, acabaram por motivar a comunidade científica a buscar compreender o desempenho ambiental da terra enquanto material de construção.

Figura 2: Artigos sobre ACV e Cimento



String de Busca: ("life cycle analysis" OR "life cycle assessment" OR "life cycle inventory" OR "lca") AND ("cement")

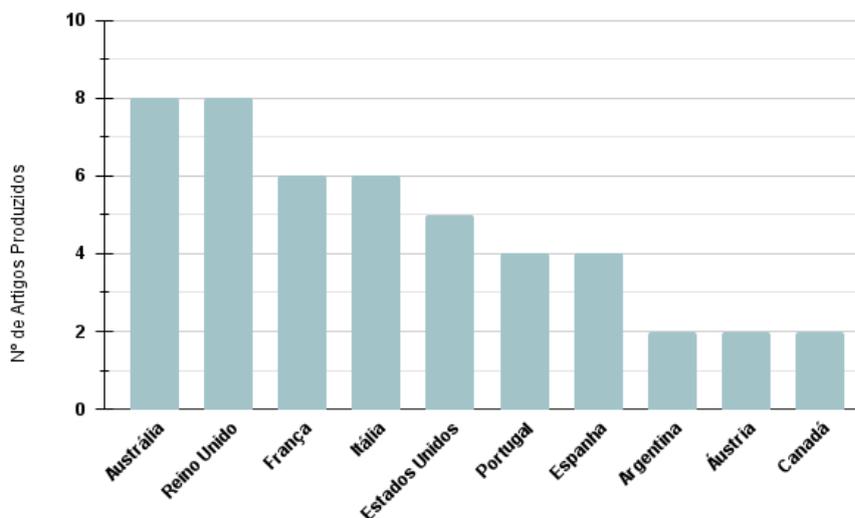


String de Busca: ("life cycle analysis" OR "life cycle assessment" OR "life cycle inventory" OR "lca") AND ("concrete")

Fonte: Autora, 2022.

Na Figura 3, os 40 artigos localizados na base Scopus foram divididos por países de origem sendo possível identificar que a Austrália e Reino Unido foram os países que mais produziram pesquisas relacionadas sobre o tema, com oito publicações cada, seguidos por França e Itália com seis publicações cada. Países como Portugal, Espanha, Argentina, Áustria e Canadá também se destacam por apresentarem alguns trabalhos sobre o tema, apesar de terem uma produção acadêmica menos expressiva.

Figura 3: Nº de artigos produzidos por país



Fonte: Autora, 2022.

Uma possível explicação para esses resultados é a existência de importantes instituições de ensino e empresas que se debruçam sobre o tema da terra e sua aplicação na construção civil, como no caso do Australian Stabilized Earth Group - ASEG, na Austrália, o Centre for Innovative Construction Materials (BRE) da Universidade de Bath, no Reino Unido, o Centre International de la Construction en Terre - CRATerre, na França, dentre outros. Dentre todos esses a Argentina se destaca como o único país da América Latina com uma produção acadêmica indexada na base Scopus, fato bastante curioso quando se tem em mente que um dos maiores grupos de pesquisa voltadas ao estudo da arquitetura com terra é o PROTERRA que conta com a participações de um número expressivo de pesquisadores e instituições de pesquisas latino-americanos.

Destaca-se que dos 40 artigos localizados na base alguns não abordam, de fato, a metodologia de ACV aplicada a arquitetura com terra, como é o caso do trabalho de Vares et. al. (2020) que discute sobre as técnicas de construção tradicionais em madeira no contexto da Finlândia. Outros trabalhos como Sonetti (2013), Fabbri et. al. (2021) e Ventura et. al. (2022), não realizam de fato uma ACV, mas fazem uma revisão bibliográfica sobre os principais desafios encontrados para a realização de uma boa ACV aplicado as construções com terra, além de discutirem sobre o desempenho mecânico e desempenho térmico da terra enquanto material de construção. Uma publicação apesar de abordar a técnica construtiva da taipa também não faz uma ACV, apenas avalia o desempenho mecânico das paredes. Outro documento encontrado refere-se a uma errata referente ao trabalho de Fernandes et. al. (2021), artigo que será abordado com detalhes mais à frente. Algumas publicações, apesar de versarem sobre o tema não foram localizadas pois não eram publicações de acesso aberto. Dessa forma, apenas 27 artigos foram encontrados e puderam ser estudados, sendo que 21 documentos são artigos de revista científica e seis são artigos de congressos. Destaca-se a

revista “*Construction and Building Materials*” com sete artigos, correspondendo a revista com maior número de publicações sobre o tema nos últimos 10 anos, a saber: (a) Paula et. al. (2022), (b) Elahi, Shahriar e Islam (2021), (c) Meek, et. al. (2021a), (d) Meek, Beckett e Elchalakani (2021b), (e) Narayanaswamy, et. al. (2020), (f) Arrigoni et. al. (2017) e (g) Serrano et. al. (2013).

Sobre as técnicas e sistemas construtivos abordadas nesses 27 documentos, foi possível observar que, além das técnicas de construção com terra, alguns artigos também fazem uma avaliação de sistemas construtivos convencionais, tais como os blocos cerâmicos furados, blocos cerâmicos maciços, blocos de concreto e wood frame, sendo que, geralmente, as análises são comparativas, ou entre as técnicas com terra, ou entre técnicas com terra e sistemas convencionais. Foram encontrados 18 artigos que abordam questões relacionadas a taipa, seis artigos discutem sobre adobe, cinco sobre BTC e apenas quatro sobre o cob.

Dentre todos esses, foram escolhidos apenas cinco artigos para serem apresentados de forma mais aprofundada. Optou-se por trabalhos que discorressem sobre a ACV em adobe, BTC ou que abordassem mais de uma técnica no mesmo trabalho. Outro critério de escolha foi a seleção de trabalhos que considerassem a incorporação de resíduos de alguma natureza e que buscassem compreender o desempenho ambiental dos materiais e sistemas. A seguir serão apresentados os trabalhos escolhidos.

a) Gazquez, Hernández e López (2022)

O objetivo desse trabalho é avaliar o impacto ambiental de dois tipos de casas, (a) a casa tradicional construída com adobe e pedras com telhado de madeira e telha cerâmica, e (b) a casa contemporânea com blocos cerâmicos furados nas paredes externas, blocos cerâmicos maciços nas paredes internas e cobertura em laje de concreto armado. Nesse trabalho, a metodologia da ACV é aplicada para o recorte do “berço ao túmulo”, contemplando as etapas de extração de materiais prima, produção e transporte até o local da obra, para 1m² de unidade funcional para uma habitação. Os autores optaram por realizar uma ACV simplificada o que implica na consideração de alguns aspectos importantes: (a) com relação as categorias de impacto, foram selecionadas apenas as categorias de energia incorporada e o potencial de aquecimento global, (b) com relação aos limites do sistema, não considerar a construção do edifício nem as fases do fim de vida, (c) com relação a construção do edifício considerar apenas o impacto ambiental referente as estruturas e as envoltória, (d) com relação ao consumo de energia durante a operação considerar apenas a energia primária necessária para o funcionamento do edifício. Além da ACV, foi realizada uma análise de desempenho térmico utilizando o software EnergyPlus para realizar simulações de energia e calcular a demanda térmica do edifício, consumo de energia e parâmetros de conforto. e os dados do modelo foram validados com medições experimentais no local.

Foram analisados dois cenários a partir das diferentes distancias: (i) Urbano: caminhão médio de 10 toneladas percorrendo uma distância máxima de 15 km (ii) Interurbano: caminhão pesado de 16 toneladas percorrendo distâncias superiores a 15 km. Com relação ao

transporte dos trabalhadores, foram considerados, para a casa contemporânea ida e volta do local da obra, para uma distância média de 10km, Já para a casa vernacular o transporte urbano não foi considerado, assumindo que os trabalhadores, no início do século XX, viajavam com veículos de tração animal. Os autores ainda levantaram todos os custos energéticos relacionado a todos os equipamentos elétricos necessário nos processos de construção.

Os resultados apontam a energia operacional (e as emissões) são muito maiores do que a energia incorporada. Isso vale para ambas as tipologias, vernáculas e contemporâneas. No caso da casa vernacular, a energia operacional representa 95,7% do ciclo de vida total. Esse percentual é muito semelhante para a casa contemporânea, que corresponde a 92,5%. Outro ponto levantado pelos autores é sobre a possibilidade de redução da demanda de energia com estratégias de projeto como proteção solar no verão e aproveitamento dos ganhos solares no inverno, utilizar fontes renováveis de energia associadas a energia elétrica convencional. Outro ponto é que a energia incorporada da casa vernacular corresponde a 35% da energia incorporada a casa contemporânea, no caso da energia operacional, essa razão corresponde a 62,9%. Conclui-se que A energia incorporada é muito menor do que a energia operacional em ambas as casas.

b) Paula Junior et. al. (2022)

O artigo objetiva a aplicação da metodologia da ACV para quantificar o desempenho ambiental de diferentes misturas de terra a partir da incorporação de alguns passivos ambientais tais como os resíduo de demolição e construção (RDC), resíduo cerâmico, agregado reciclado de concreto e agregado reciclado de argamassa, para isso, os autores optaram por selecionar dez trabalhos que investigassem o desempenho mecânico da terra com incorporação desses passivos. Como critério de seleção, os autores optaram por selecionar apenas trabalhos que apresentaram proporções de material por metro cúbico e que apresentam a quantidade de passivo incorporado em porcentagem. Os artigos abordam as técnicas do BTC, taipa, blocos de taipa e adobe.

Como relação as fronteiras do sistema, a ACV é aplicada do berço ao portão, considerando como unidade funcional 1m³ de mistura, sendo definidos dois diferentes cenários, (i) o primeiro cenário considera o transporte do RDC de uma estação de tratamento de resíduos localizada a 139 km do canteiro de obras, e (ii) o segundo cenário considera que tanto a terra quanto os RDC podem ser obtidos diretamente no canteiro de obras.

É importante destacar que, para os materiais como areia, cimento, cal e agregados utilizados nas misturas, foram adotados os dados genéricos encontrados nos bancos de dados e adaptados e contextualizados para o cenário português. Com relação aos solos, não foram alocados custos energéticos pois considerou-se que o solo foi extraído no próprio terreno.

Sobre a metodologia aplicada a ACV os autores utilizaram o método MARS-SC que contempla as análises das seguintes categorias de impacto: aquecimento global (GWP), depleção da

camada de ozônio (ODP), acidificação (AP), eutrofização (EP), potencial de oxidação fotoquímica (POCP) e depleção abiótica fósseis (ADP-ff).

Como resultados, o artigo verificou que impacto ambiental das misturas é afetado negativamente, principalmente, pela fase de transporte por conta dos custos energéticos considerados na queima dos combustíveis. Além dos custos de transporte, destacam-se os valores encontrados para categorias como ADP-ff e GWP, pois estão diretamente relacionados à presença do clínquer, principal constituinte do cimento, caracterizado pela alta emissão de CO₂ e consumo de energia durante seu processo de produção.

c) Elahi, Shahriar e Islam (2021)

Esse trabalho se concentra na investigação do desempenho ambiental dos BTCs estabilizados com cimento e cinzas volantes como uma alternativa mais ecológica aos blocos cerâmicos tradicionais. Além de avaliar o desempenho ambiental o trabalho de ocupa a compreender o desempenho mecânico dos BTC sendo analisadas as questões de resistência à compressão, tração, flexão e cisalhamento.

Para a avaliação do desempenho ambiental, a ACV foi aplicada do berço ao portão (A1-A3), contemplando as etapas de extração de materiais prima, produção e transporte até o local da obra. A unidade funcional adotada foi uma parede de 3m de comprimento, 3m de altura e espessura de 25cm. As categorias de impactos analisadas foram aquecimento global (GWP), depleção abiótica de combustíveis fósseis (ADP-ff), potencial de oxidação fotoquímica (POCP), acidificação (AP), toxicidade humana (HTP) e eutrofização (EP). Com relação as etapas de extração e preparo do solo, não foram alocados recursos energéticos já que esses processos podem ser realizados de forma manual. Com relação aos custos energéticos dos cimentos e da cinza volante, foram estudados apenas a mistura que recebeu a incorporação de 5% de cimento e 20% de cinza volante, pois foi aquela apresentou os melhores resultados para o desempenho mecânico. Com relação aos custos foram avaliados dois pontos: os custos de mão de obra e os custos com materiais. Como a análise de custo não faz parte dessa revisão bibliográfica, esses pontos não serão aqui apresentados

Os resultados da ACV, foram simplificados e apresentados considerando dois parâmetros o consumo de energia elétrica e o potencial de aquecimento global. Para a etapa de extração de matéria-prima, os BTCs apresentaram um custo ambiental inferior aos blocos cerâmicos tradicionais, por conta do baixo custo energético necessário para a extração do solo uma vez que é feito manualmente. Na etapa de produção os blocos cerâmicos também apresentaram um impacto maior principalmente por conta da demanda energética necessária durante o processo de queima da cerâmica. Além disso, os BTCs contam com uma quantidade pequena de cimento e cinzas volantes dentro da mistura, 5% e 20% respectivamente. Com relação a etapa de transporte, verificou-se que os dois elementos apresentam impactos similares, já que estão inseridos no mesmo cenário. De forma geral, com relação ao consumo de energia e ao potencial de aquecimento global, os BTCs apresentam um desempenho ambiental superior aos blocos cerâmicos tradicionais.

d) Cabrera et. al. (2020)

Este trabalho apresenta a avaliação do impacto ambiental e desempenho mecânico dos BTCs estabilizados com cal hidratado e cimento Portland. Para isso, foram fabricados 12 blocos estabilizados com diferentes proporções de cal e cimento e utilizada a metodologia de ACV para a avaliação ambiental. Foi adotado como unidade funcional o BTC com 15cm x 30cm x 7,5cm. O escopo do estudo limitou-se à abordagem denominada “do berço ao portão”, contemplando as etapas de extração de materiais prima, produção e transporte até o local da obra. Foram considerados os custos de transporte da matéria-prima até a fábrica para uma distância de 35km. Os custos energéticos para os estabilizantes cal e cimento foram retirados dos bancos de dados. Para o transporte da matéria-prima, foi considerado o uso de caminhão com capacidade de 16-32 toneladas para o transporte de terra e areia.

Como resultados os autores apontam que as misturas que obtiveram uma incorporação maior de estabilizantes, apresentam um impacto ambiental mais expressivo para categorias como acidificação do solo e da água eutrofização (EP), potencial de oxidação fotoquímica (POCP) e depleção abiótica de minerais (ADP-e). Com relação a categorias como depleção abiótica de combustíveis fósseis (ADP-ff) e a depleção da camada de ozônio (ODP) são significativamente maiores para o BTC estabilizado com cal. Conclui-se também que a estabilização com cal aérea não aumenta a força compressiva da CEB e, ao contrário, aumenta significativamente seu impacto negativo sobre o meio ambiente.

e) Christoforou et. al. (2016)

Nesse trabalho os autores objetivaram compreender o impacto ambiental da produção de adobes com incorporação resíduos de fibras, como a palha de trigo e serragem. Como relação as fronteiras do sistema, a ACV é aplicada do berço ao portão (A1-A4), sendo definidos três diferentes cenários: (i) o primeiro considera a produção dos adobes no canteiro utilizando solo do próprio terreno o resíduo de fibra (palha de trigo e serragem) transportada a uma distância de 50km do terreno, (ii) o segundo considera a produção dos adobes no canteiro utilizando solo e resíduo de fibra ambos transportados a uma distância de 50km do terreno e (iii) o terceiro considera a produção dos adobes em uma fábrica a 100km do canteiro de obras e a utilização do solo e do resíduo de fibra transportados a 50km da fábrica. A unidade funcional adotada foi de 1kg de adobe.

Com relação as etapas de produção dos adobes para (1) extração e preparo do solo, foram consideradas o custo energético utilizando um caminhão escavadeira, (2) para a produção, preparo e aplicação de palha de trigo e serragem, assume-se que elas são resíduos de outros processos de produção não sendo alocado nenhum custo ambiental para esses passivos ambientais sendo que o único custo atrelado a esses materiais foi a energia elétrica utilizada para triturar as fibras, (3) para o abastecimento de água não foram considerados custos energético alocado, (4) para transporte de matéria prima, foi alocado custo energético de um caminhão movido à diesel de acordo com as distâncias definidas em cada cenário, (5) para o processo de mistura incluíram-se os custos energéticos de um mixer conectado a rede elétrica

durante 10min, (6) para a produção assumiu-se que todos os processos foram feitos manualmente e nenhuma entrada de energia foi considerada, (7) para secagem não há custo energético alocado e (8) para o transporte final do produto, foi alocado um custo energético de um caminhão movido à diesel de acordo com as distâncias definidas em cada cenário.

Sobre a metodologia aplicada a ACV os autores optaram por aplicarem o método CML (2001) que contempla a avaliação das seguintes categorias de impacto: potencial de aquecimento global (GWP), acidificação (AP), eutrofização (EP), redução da camada de ozônio (ODP), depleção abiótica (ADP), ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, toxicidade humana e potencial de oxidação fotoquímica (POCP)

Os autores destacam que os cenários com maior impacto ambiental nas categorias de aquecimento global e esgotamento abiótico foram aqueles que envolvem o transporte do produto da fábrica até o local da obra, ressaltando a importância da produção de adobe no local. Sobre a utilização da palha de trigo e serragem, os autores apontam que o custo energético desses materiais é baixo e indica o seu uso para a produção dos adobes.

4. Considerações Finais

Esse trabalho buscou apresentar uma revisão sobre a produção científica referente a aplicação da metodologia de ACV na produção da arquitetura com terra. Foi possível verificar que a produção científica que é apresentada pela base Scopus é muito recente sendo identificados apenas 40 artigos que versam sobre o tema, nos últimos 10 anos. Nesse contexto ressalta-se a verdadeira necessidade de se investir nas pesquisas relacionadas ao tema, principalmente, quando se relaciona às discussões referentes ao desenvolvimento sustentável.

Portanto, foram apresentados aqui alguns trabalhos que que discorressem sobre a ACV aplicadas as diversas técnicas de construção com terra como o adobe, BTC e taipa. Buscou-se por trabalhos que considerassem a incorporação de resíduos de alguma natureza e que, também buscassem compreender o desempenho ambiental dos materiais e sistemas. De forma geral, o estudo da ACV contribui de forma significativa para o entendimento de que as técnicas e sistemas construtivos com terra assumem um papel de extrema relevância dentro do contexto do desenvolvimento sustentável, já que, em diversos trabalhos foi possível verificar que, essas técnicas de fato apresentam um melhor desempenho ambiental quando comparado com as técnicas tradicionais.

Em todos os trabalhos apresentados, fica claro que os custos energéticos referente ao transporte, tanto de matérias-primas como do produto até o canteiro, é um gargalo na adoção dessas técnicas. Sendo assim, é importante destacar que a produção dos BTC, adobes ou paredes de taipa, utilizando a terra do próprio terreno, é um caminho favorável para a adoção dessas técnicas.

Outro ponto de destaque é que, o desempenho mecânico, em alguns cenários influencia significativamente o desempenho ambiental dos sistemas, pelo fato de que quanto mais estabilizante químico é incorporado maior é o impacto ambiental do sistema, uma vez que a

cadeia produtiva desses estabilizantes são muito custosas energeticamente. Outro ponto é o processo de fabricação pois a escolha por processos de fabricação manual diminui a energia incorporada dos sistemas. Isso acontece pois, no escopo desses trabalhos não se alocaram os custos energéticos para o trabalho humano, que deveriam ser avaliados segundo a metodologia da ACV-Social.

Além disso, cabe ressaltar que o projeto de arquitetura é extremamente relevante, principalmente quando se é discutida a questão da energia de operação da edificação, pois nesse contexto, questões relacionadas posição do sol, ventilação, contexto urbano, estratégias bioclimáticas de projetos, todos esses fatores interferem no consumo energético operacional.

Como conclusão geral, confirma-se, ao final desse trabalho, que a terra e suas técnicas construtivas representam uma importante alternativa na busca por técnicas de construção que impactem menos o meio ambiente.

Referências:

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14.040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. O desafio da sustentabilidade na construção civil. In: GOLDEMBERG, J. **Série Sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, v. 5, 2011.
- ARRIGONI A., BECKETT C., CIANCIO D., DOTELLI G.. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, 2017.
- BAYER, A. P. **Proposta de diretrizes para o desenvolvimento da arquitetura em terra no Rio Grande do Sul, a partir da interpretação de estratégias uruguaias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – EE/UFRS. ed. Porto Alegre: BR-RS, 2010.
- BEN-ALON, L. et al. Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material. **Building and Environment**, 14 maio 2019. 1-22.
- CABRERA, S. P. et al. Compressed earth blocks (CEB) stabilized with lime and cement. Evaluation of both their environmental impact and compressive strength. **Habitat Sustainable**, 2020.
- CALDAS, L.; LIRA, J.S.M.M.; SPOSTO, R.M. Avaliação do Ciclo de Vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas. **Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, Brasília, v. 1, p. 30, Jul/Dez 2017.
- CARVALHO, B.T.; SILVOSO, M. M.; MINTO, F. C. N. **ARQUITETURA EM TERRA NA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL**. 17º SIACOT - Seminário Ibero Americano de Construção com Terra. La Paz: [s.n.]. 2017.
- CARVALHO, Beatriz Temtemples. **Arquitetura com Terra na Construção Sustentável: Blocos de Terra Comprimido para Produção de Habitação**. Dissertação (Mestrado em

- Arquitetura). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura - FAU/UFRJ. Rio de Janeiro. 2019.
- CARVALHO, Tathiana Nascimento. **Diretrizes da avaliação do ciclo de vida aplicadas à tomada de decisões em projeto**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Rio de Janeiro: UFRJ - Proarq. 2018.
- CHRISTOFOROU, E. et al. Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 443 - 452, Janeiro 2016.
- DGNB, German Sustainable Building Council. **Building for a Better World: How Buildings Contribute to the ONU Sustainable Development Goals (SDGs)**. [S.l.]. 2020.
- ELAHI, T. E.; SHAHRIAR, A. R.; ISLAM M. S. Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash. **Construction and Building Materials**, 2021.
- FABBRI, A., MOREL, J.C., AUBERT, J.-E., BUI, Q., GALLIPOLI, D., VENTURA, A., REDDY, V. B. V., HAMARD, E., PELÉ-PELTIER, A., ABHILASH, H.N. **An overview of the remaining challenges of the RILEM TC 274-TCE, testing and characterisation of earth-based building materials and elements**. RILEM Technical Letters. [S.l.], p. 150-157. 2021.
- FATHY, H. **Construindo com o Povo: arquitetura para os pobres**. Rio de Janeiro: Salamandra, 1980.
- FERNANDES, J. et al. Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, 2021.
- GAZQUEZ, L. A. M. ; HERNÁNDEZ, F. F. ; LÓPEZ, J. M. C.. A Comparison of Traditional and Contemporary Social Houses in Catamarca (Argentina). Comfort Conditions and Life Cycle Assessment. **Sustainable Cities and Society**, v. 82, 2022.
- HICKSON, P. **Earth building—how does it rate?** Rammed Earth Construction - Proceedings of the 1st International Conference on Rammed Earth Construction. [S.l.]: [s.n.]. 2015. p. 107-110.
- HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Traité de Construction en Terre**. Marseille: Editions Parenthèses, 2006.
- JENKINS SWAN, A., RTEIL, A., LOVEGROVE, G. **Wood-frame vs. compressed earth block construction: Which alternative is better?** Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 2547-2556.
- MATEUS, R. et al. Sustainability assessment of an energy efficient optimized solution. In: SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Proceedings of the 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century**. [S.l.]: Santamouris, M., Wouters, P. (Eds.), 2007. p. 636–640.
- MATEUS, R.; FERNANDES, J.; TEIXEIRA, E.R. Environmental Life Cycle Analysis of Earthen Building Materials. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**, 2019.
- MEEK A.H., BECKETT C.T.S., ELCHALAKANI M.. Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Durability with and without water repellent. **Construction and Building Materials**, 2021b.

- MEEK et al. Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, 2021a.
- MILETO, C., VEGAS, F., SORIANO, L. G., CRISTINI, V. **Vernacular Architecture: Towards a Sustainable Future**. Proceedings of the International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture. [S.l.]: [s.n.]. 2015.
- MINKE, G. **Manual de Construção em Terra: uma arquitetura sustentável**. 1ª. ed. São Paulo: B4, 2015.
- NARAYANASWAMY A.H., WALKER P., VENKATARAMA REDDY B.V., HEATH A., MASKELL D.. Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. **Construction and Building Materials**, 2020.
- PAULA JUNIOR A.C. et al. Analysis of the effect of incorporating construction and demolition waste on the environmental and mechanical performance of earth-based mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 330, Maio 2022.
- PROTERRA, Rede Ibero-Americana de Arquitetura e Construção com Terra. Página do PROTERRA. **Sobre o PROTERRA**, 2022. Disponível em: <<https://redproterra.org/pt/sobre-proterra/>>. Acesso em: 06 ago. 2022.
- SERRANO S., BARRENECHE C., RINCÓN L., BOER D., CABEZA L.F.. Optimization of three new compositions of stabilized rammed earth incorporating PCM: Thermal properties characterization and LCA. **Construction and Building Materials**, 2013.
- SERRANO, S., BARRENECHE, C., RINCÓN, L., BOER, D., CABEZA, L.F. Stabilized rammed earth incorporating PCM: Optimization and improvement of thermal properties and Life Cycle Assessment. **Energy Procedia**, v. 30, p. 461-470, 2012.
- SONETTI, G. **Energy and architecture - An overview**. EPJ Web of Conferences. [S.l.]: [s.n.]. 2013.
- UNEP, United Nation Environmental Programme. **Global Status Report for Buildings and Construction**. [S.l.]. 2021.
- UNESCO. World Heritage Earthen Architecture Programme (WHEAP). **World Heritage Convention - UNESCO**, 2017. Disponível em: <<https://whc.unesco.org/en/earthen-architecture/>>. Acesso em: 2022 ago. 06.
- VARES, S., SAVOLAINEN, P., HÄKINEN, T., SHEMEIKKA J., HUTTNEN, M., ZUBILLAGA, L. **Concepts and type building for carbon neutral construction in arctic Finland based on tradition**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Gothenburg: [s.n.]. 2020.
- VENTURA A., OUELLET-PLAMONDON C., RÖCK M., HECHT T., ROY V., HIGUERA P., LECOMPTE T., FARIA P., HAMARD E. **Environmental Potential of Earth-Based Building Materials: Key Facts and Issues from a Life Cycle Assessment Perspective**. RILEM State-of-the-Art Reports. [S.l.]: [s.n.]. 2022. p. 261-296.
- WGBC, World Green Building Council. **Advancing Net Zero Whole Life Carbon: Offsetting Residual Emissions from the Building and Construction Sector**. World Green Building Council. [S.l.]. 2021.