XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Energia embutida: Análise dos impactos do *retrofit* de um edifício comercial no ciclo de vida energético

Embodied energy: Analysis of the impacts of a commercial building retrofit on the energy life cycle

Taylana Piccinini Scolaro
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | taylanaps@gmail.com
Alessandra Teixeira
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | alessandrateixeira.t@gmail.com
Enedir Ghisi
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | enedir.ghisi@ufsc.br
Sergio Fernando Tavares
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | sergioftavares@gmail.com

Resumo
Este trabalho teve como objetivo comparar a energia embutida (EE) associada com a fase pré-operacional de uma construção convencional nova (cenário 1) com a EE do retrofit de uma edificação existente incorporando cobertura verde, painéis fotovoltaicos, fachada verde e madeira laminada colada (cenário 2). Uma edificação comercial localizada em Curitiba-PR foi escolhida. Os resultados mostraram que a EE do cenário 2 reduziu em 39% em comparação com o cenário 1. Os materiais que compõem a estrutura e a vedação apresentaram maior EE em ambos os cenários. Concluiu-se que o retrofit de edificações existentes pode ser viável se considerada apenas a EE.

Palavras-chave: Energia embutida. Análise energética. Readequação. Edificação comercial.

Abstract
This work aimed to compare the embodied energy (EE) associated with the preoperational phase of new conventional construction (scenario 1) with the EE of existing building retrofit incorporating green roof, photovoltaic panels, green wall and glued laminated timber (scenario 2). A commercial building located in Curitiba-PR was chosen. The results showed that the EE of scenario 2 decreased 39% compared to scenario 1. The materials of structure and masonry showed the highest EE for both scenarios. It was concluded that the retrofit of old buildings might be feasible when considering only EE.

Como citar:
SCOLARO, T. P.; TEIXEIRA, A.; GHISI, E.; TAVARES, S. F. Energia embutida: Análise dos impactos do *retrofit* de um edifício comercial no ciclo de vida energético. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Keywords: Embodied energy. Energy analysis. Retrofit. Commercial building.

INTRODUÇÃO

O setor de edificações é responsável por mais de um terço do consumo global de energia final e quase 40% do total de emissões diretas e indiretas de CO_2 [1]. No Brasil, o setor responde por cerca de 50% do consumo de energia [2]. O uso de energia e recursos por parte das edificações ocorre tanto na fase de produção de materiais, quanto nas fases de operação e manutenção e no final da vida útil.

A avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) é uma ferramenta simplificada de análise do ciclo de vida que prioriza os insumos energéticos. No setor das edificações, a ACVE permite comparar o consumo de energia de diferentes edifícios ou demonstrar os benefícios de estratégias de projeto utilizadas para otimizar o desempenho energético, considerando o consumo de energia durante o ciclo de vida [3][4]. O ciclo de vida energético geralmente inclui energia embutida (EE), energia operacional (EO) e energia de desconstrução (ED) [5].

O trabalho de Tavares [5], um dos estudos pioneiros sobre ACVE de edifícios no Brasil, reportou sobre o consumo energético no ciclo de vida de edificações residenciais brasileiras, cujo resultado variou entre 15 e 25 GJ/m². A energia embutida representou entre 29% e 49% da energia de todo o ciclo de vida, evidenciando a relevância dos estudos sobre energia embutida.

Uma das formas de reduzir o consumo de energia é através do *retrofit* de edificações existentes [6]. A partir da ACVE do *retrofit* de edifícios, estudos demonstram que a incorporação de materiais no processo de *retrofit* gera aumento na energia embutida. No entanto, este aumento pode ser compensado pelo melhor desempenho da edificação, diminuindo o consumo de energia na fase operacional [7] [8]. O *retrofit* de edificações pode ser tratado como uma solução que condiz com a conservação e respeito ao bem edificado já incorporado à paisagem urbana, e ainda com o conceito de sustentabilidade [9].

Alla et al. [7] avaliaram o impacto da implementação do isolamento da envoltória na economia de energia de edificações residenciais em dez cidades italianas por meio do *payback* energético. O cálculo do *payback* foi baseado na comparação entre a energia operacional economizada e a energia embutida dos materiais selecionados para o isolamento. Os resultados apresentaram significativa dependência da zona climática. Em cidades do norte da Itália, o *payback* energético foi de cerca de 3 anos, em comparação com 84 anos em cidades localizadas no sul.

Sartori e Calmon [6] analisaram o consumo de energia nas fases pré-operacional e operacional de duas edificações residenciais com a aplicação de cinco medidas sustentáveis de *retrofit* (cobertura verde, vidros refletivos, brise para sombreamento, redução da absortância da envoltória e fachada ventilada). A análise mostrou melhorias significativas na fase operacional de ambos os edifícios, tanto na rotulagem como no consumo de energia. No entanto, ao analisar o ciclo de vida, algumas medidas foram ineficazes. Este estudo ressaltou que a escolha de medidas

de *retrofit* para reduzir o consumo de energia ao longo do ciclo de vida deve ser precedida de uma ampla pesquisa, tanto dos materiais a serem adicionados ao edifício existente quanto os padrões de consumo de energia dos usuários.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar a energia embutida (EE) associada com o desenvolvimento de um cenário de *retrofit* em uma edificação atualmente desocupada com a incorporação de infraestruturas sustentáveis, em comparação com a EE de uma construção nova similar. A análise visa viabilizar a ocupação de edificações sem uso através de *retrofit* com infraestruturas sustentáveis em detrimento de construções de novos empreendimentos.

MÉTODO

ESTUDO DE CASO

A análise foi desenvolvida para um edifício comercial de quatro pavimentos (térreo e três pavimentos), com área de 3.060,45 m² em terreno de 954,00 m², construído entre 1973 – 1975, localizado na região central de Curitiba-PR (Figura 1). A edificação em alvenaria convencional foi inicialmente construída para uso como hotel, entretanto, assim que concluída a construção, o imóvel foi vendido e reformado para uso do serviço público. Atualmente, a edificação se encontra desocupada, de modo que é alvo de atos de vandalismo e necessita de reformas substanciais para possibilitar nova utilização.

Diante desse cenário, para o estudo, considerou-se um projeto hipotético de *retrofit* do edifício para uso como *coworking*, visando a economia compartilhada e flexibilidade de ambientes. Assim, para o projeto hipotético, buscou-se um nível de detalhamento de um projeto básico, com delimitações das soluções construtivas e delimitações dos ambientes.

Figura 1: Imagem da edificação em estudo



Fonte: os autores.

CENÁRIOS AVALIADOS

Dois cenários foram considerados na análise: (1) construção de uma edificação nova convencional similar ao edifício existente, e (2) *retrofit* do edifício para uso como *coworking*.

No cenário 1, foram consideradas as informações de quantidade de material por área construída do projeto padrão denominado Prédio Popular de Padrão Normal, designado como PP 4 – Normal, conforme NBR 12721 [10], uma vez que essa tipologia apresentou maior semelhança com a edificação existente dentre as tipologias apresentadas na Norma. Destaca-se que para a análise foram selecionados apenas os materiais passíveis de serem quantificados e comparados com o projeto de *retrofit*.

No cenário 2, foram consideradas as etapas de demolição e de readequação de acordo com o projeto hipotético de um *coworking*, o qual contempla no pavimento térreo áreas para café, bicicletário, auditório, banheiros e circulação. Nos pavimentos tipos, áreas compartilhadas para estações de trabalho, juntamente com um *lounge* interno. Por fim, a cobertura apresenta um *lounge* externo.

Além de reformas necessárias para proporcionar o atendimento à proposta estabelecida, algumas soluções foram adotadas nesse projeto visando a sustentabilidade do edifício: cobertura verde, painéis fotovoltaicos, fachada verde e madeira laminada colada. Essas medidas foram selecionadas devido ao potencial de melhorar o desempenho termoenergético da edificação [11][12][13] e reduzir as emissões de gases poluentes [14] durante a vida útil, com interferências mínimas na estrutura da edificação.

Nesse projeto, a cobertura verde e os painéis fotovoltaicos ocuparam parte da cobertura e a parcela restante desse pavimento foi destinada à circulação de pessoas. Os painéis fotovoltaicos também foram projetados para ocupar parte das fachadas norte e oeste dos três pavimentos superiores. A fachada verde foi projetada em parte da fachada norte e leste dos três pavimentos superiores. Na fachada frontal do térreo, madeira laminada colada foi utilizada como revestimento. Ao total, foram projetados 495 m² de cobertura verde, 124 m² de painéis fotovoltaicos, 228 m² de fachada verde e 77 m³ de madeira laminada colada.

ENERGIA EMBUTIDA

O cálculo da energia embutida (EE) dos materiais durante a fase pré-operacional (materiais, transporte, desperdício e transporte de desperdício) seguiu duas etapas principais: (i) determinação da quantidade de materiais em unidade de massa por metro quadrado de construção e (ii) cálculo da energia embutida por meio da Equação 1, seguindo a metodologia estabelecida por Tavares [5]. Para a análise de EE, foram selecionados apenas os materiais componentes da estrutura, alvenaria, revestimento, janelas e cobertura, além dos materiais do *retrofit*, como mostra o Quadro 1. Para os valores de EE, procurou-se utilizar dados de referências nacionais. Nos casos em que essas referências não foram encontradas, dados internacionais foram utilizados.

$$EE_{total} = Massa_{material} \times EE_{material} \quad (1)$$

Onde:

EE_{total}: energia embutida total (MJ);

$Massa_{material}$: massa do material (densidade x volume) (kg);

$EE_{material}$: energia embutida do material (MJ/kg).

Quadro 1: Materiais inclusos no quantitativo e valores de energia embutida por material

Material	**Cenário 1: Construção nova convencional**	**Cenário 2: *Retrofit* da edificação existente**		**Energia embutida (EE)**	**Referência**
		Demolição	**Readequação**		
Concreto	Sim	Sim	Sim	1,2 MJ/kg [a]	Reis e John [15]
Cimento	Sim	Sim	Sim	4,5 MJ/kg [b]	Belizario-Silva [16]
Areia	Sim	Sim	Sim	0,5 MJ/kg	Tavares e Bragança [17]
Tijolo cerâmico	Sim	Sim	Sim	3,4 MJ/kg [c]	Cleto et al. [18]
Telha de fibrocimento	Sim	Sim	Sim	6,0 MJ/kg	Tavares e Bragança [17]
Revestimento cerâmico	Sim	Sim	Sim	3,0 MJ/kg	Tavares e Bragança [17]
Vidro	Sim	Sim	Sim	18,5 MJ/kg	Tavares e Bragança [17]
Tinta	Sim	Sim	Sim	75 MJ/kg	Tavares e Bragança [17]
Cobertura verde vernacular [d]	Não	Não	Sim	1.113,6 MJ/m²	Lopes [19]
Painel fotovoltaico	Não	Não	Sim	3.000,0 MJ/m² [e]	Wong, Royapoor e Chan [20]
Fachada verde em manta	Não	Não	Sim	150,1 MJ/ m²	Oliveira [21]
Madeira laminada colada	Não	Não	Sim	12,0 MJ/kg	Hammond e Jones [22]

[a] Valor médio aproximado de EE de concreto de 25 MPa e densidade 2.300 kg/m³.

[b] Valor médio aproximado de EE de cimento CP II-F.

[c] Valor médio aproximado de EE de tijolo cerâmico para vedação com dimensões (14x19x29) cm.

[d] Considerado apenas as camadas da cobertura verde (impermeabilização, manta geotêxtil de poliéster, argila expandida e substrato) e desconsiderado a estrutura, visto que a edificação já possui laje.

[e] Valor aproximado de EE com base em valores reportados por estudos mais recentes (2014).

Fonte: os autores.

No cenário 1, para a determinação da massa de cada material, inicialmente, as quantidades de materiais por metro quadrado de construção dadas pela NBR 12721 [10] (em metro cúbico, metro quadrado, unidade, litro e quilograma) foram padronizadas e transformadas em unidade de massa por metro quadrado (kg/m²). As quantidades informadas em metro cúbico (concreto e areia) foram multiplicadas pelas suas respectivas densidades. As dadas em metro quadrado (telha de fibrocimento, azulejo e vidro) foram multiplicadas pela espessura e pela densidade dos materiais. A quantidade de tijolo reportada em unidade foi multiplicada pelo volume e pela densidade. A quantidade de tinta dada em litros foi multiplicada pela

densidade e a quantidade de cimento dada em quilograma foi mantida na mesma unidade. Ao final, a EE total calculada foi multiplicada pela área da edificação.

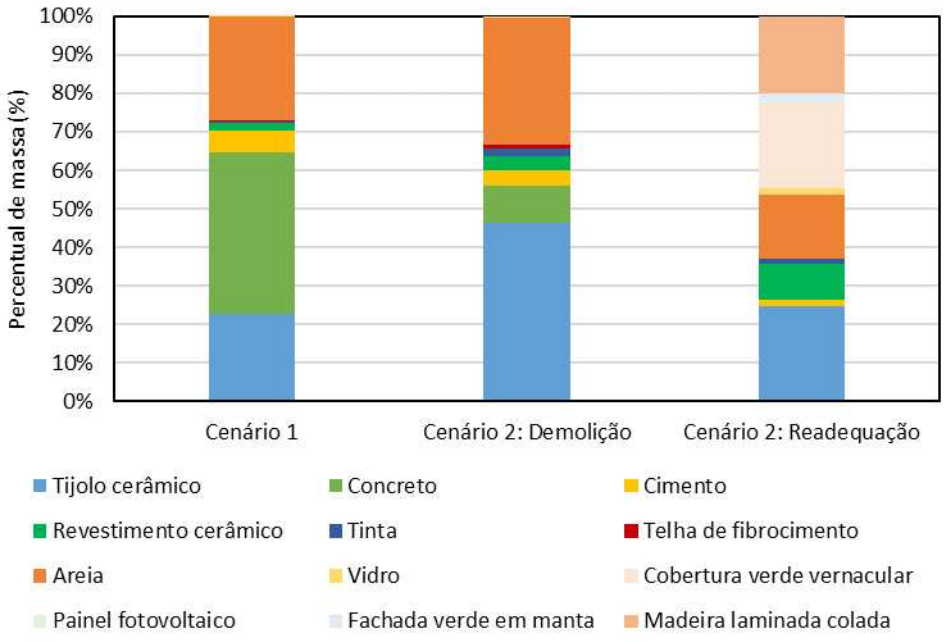
No cenário 2, a extração dos quantitativos dos materiais demolidos e utilizados para o *retrofit* foi realizada a partir da modelagem do edifício no programa computacional Revit. As quantidades foram extraídas em área ou volume e transformadas em unidade de massa, com exceção da cobertura verde, dos painéis fotovoltaicos e da fachada verde, em que a unidade foi mantida em unidade de área (compatível com o valor de EE encontrado na literatura).

Os valores para densidade dos materiais, fator de transporte dos materiais, desperdício e transporte de desperdício adotados foram os descritos em Tavares [5]. Os valores de energia embutida para cada material de construção foram obtidos na literatura (Quadro 1).

RESULTADOS

A Figura 2 apresenta o percentual de massa dos materiais de construção considerados em ambos os cenários.

Figura 2: Materiais de construção considerados nos cenários 1 e 2



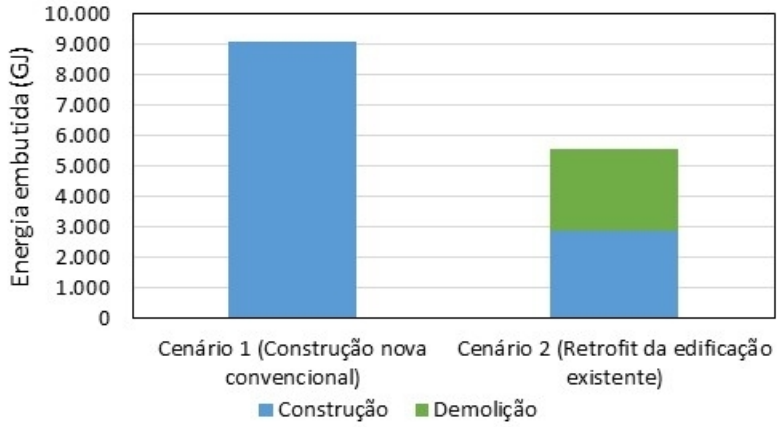
Fonte: os autores.

Para o cenário 1 (construção nova convencional conforme projeto padrão) foi utilizado um total de 3.795,5 t de materiais de construção – obtidos na Tabela 5 da NBR 12721 [10]. Os materiais responsáveis pela maior quantidade de insumo em massa foram o concreto (42%), a areia (27%) e o tijolo cerâmico (23%). O concreto foi considerado em toda a estrutura da edificação, enquanto a areia e o tijolo cerâmico compõem a argamassa de revestimento e a alvenaria de vedação, respectivamente.

Para o cenário 2 (*retrofit* da edificação), foram utilizadas 949,9 t de material, sendo 677,7 referentes à etapa de demolição e 272,2 referentes à etapa de readequação. Na etapa de demolição, 46% de toda a massa de materiais demolidos foi referente ao tijolo cerâmico, 33% referente à areia e 10% ao concreto. Esses percentuais relacionam-se com as parcelas da estrutura e da vedação que necessitaram de reformas para adequação da edificação existente ao projeto hipotético de *coworking*. Na etapa de readequação, o tijolo cerâmico (25%), a cobertura verde (22%), a madeira laminada colada (20%) e a areia (17%) foram os materiais com as maiores quantidades empregadas em massa. A cobertura verde vernacular proposta visa a obtenção de um sistema de menor peso em comparação com coberturas verdes intensivas, por exemplo, que apresentam substratos mais espessos e que permitem maior acúmulo de água. Ainda assim, a cobertura apresentou cerca de 120 kg/m² [16].

Os resultados de energia embutida para ambos os cenários de edificação, considerando apenas os materiais de construção descritos no estudo de caso, são apresentados na Figura 3.

Figura 3: Energia embutida nas etapas de construção e demolição para os cenários 1 e 2



Fonte: os autores.

A EE total obtida para o cenário 1 (construção nova convencional conforme projeto padrão) foi de 9.107,19 GJ. Para o cenário 2 (*retrofit* da edificação), o valor de EE foi de 5.548,64 GJ, sendo 2.650,59 GJ oriundos da etapa de demolição e 2.898,05 GJ do processo de readequação. Apesar de alguns dos sistemas construtivos do cenário 2 apresentarem elevados valores de energia embutida, a quantidade de materiais empregados no *retrofit* foi 75% menor (em massa) em comparação com a construção nova. Dessa forma, o valor total de EE do cenário 2 foi 39% menor que do cenário 1.

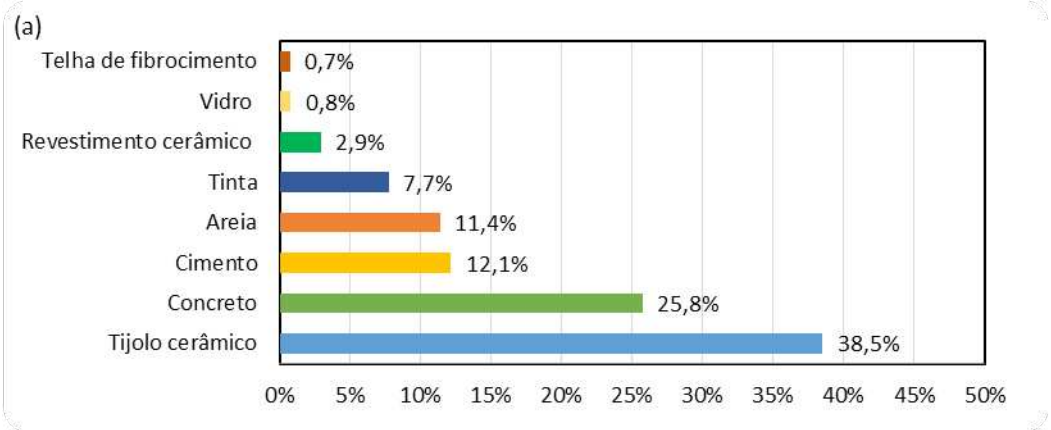
Dentre os estudos da literatura, não existe consenso quanto às etapas do ciclo de vida do edifício a serem consideradas. A consideração dos impactos embutidos nos materiais durante a etapa de demolição já seria reportada na análise da etapa de construção do edifício. No caso deste estudo, buscou-se desenvolver um cenário comparativo, de forma que, ao considerar apenas a EE do processo de readequação e do transporte do material demolido, o valor total de EE do cenário 2 seria de 2.986,15 GJ (67% menor do que a EE do cenário 1).

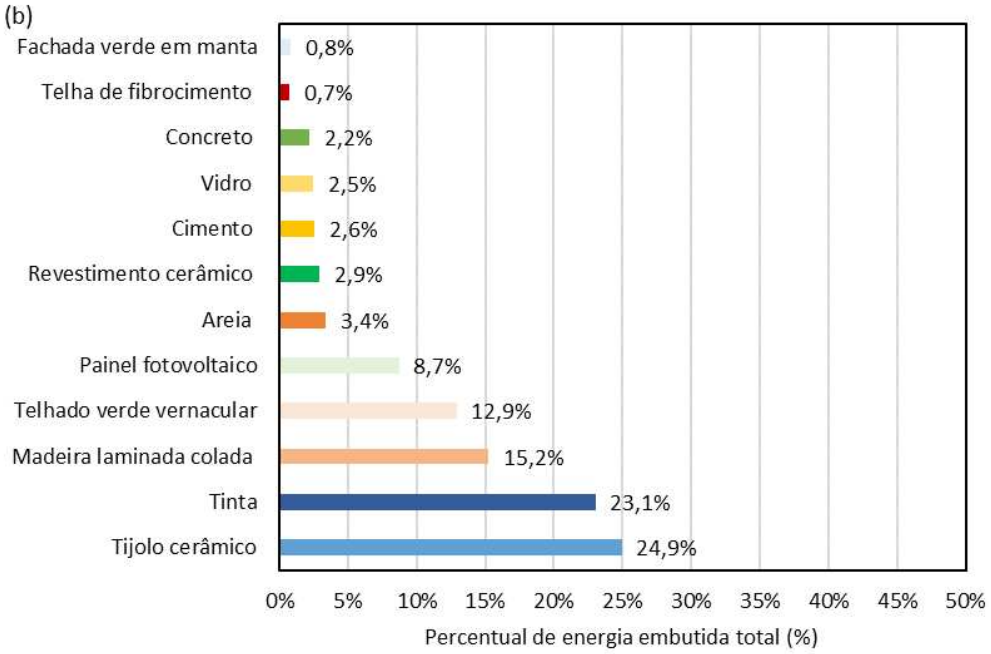
A Figura 4 mostra a contribuição percentual de cada material de construção com a energia embutida total do cenário 1 e do cenário 2 (readequação e demolição).

No cenário 1, o concreto, o tijolo cerâmico e o cimento responderam juntos por aproximadamente 76% da energia embutida total, devido à grande quantidade de materiais que a estrutura e a alvenaria de vedação representam na construção nova convencional (70% da massa total de materiais necessários).

No cenário 2, os materiais que mais contribuíram com a energia embutida total foram o tijolo cerâmico e a tinta, devido ao volume de paredes demolidas pelo projeto de *retrofit* para adaptação da edificação ao uso como *coworking* e ao elevado valor de EE da tinta. Dentre as medidas adotadas pelo projeto de *retrofit* visando tornar a edificação mais sustentável ao longo de sua vida útil, a madeira laminada colada e a cobertura verde foram as soluções que apresentaram os maiores percentuais em relação à energia embutida total, dada a extensão de aplicações desses materiais no projeto de *retrofit* e pelos valores de EE por material. Salienta-se que no projeto do *coworking* desenvolvido, a madeira laminada colada foi a solução construtiva adotada para as novas vedações internas. Sartori e Calmon [6] também reportaram contribuição expressiva da cobertura verde com a energia embutida do *retrofit* de edificações. Isso ocorreu, principalmente devido à elevada EE da camada de impermeabilização. Segundo Lopes [16], no sistema de cobertura verde vernacular, a impermeabilização é responsável por cerca de 68% da EE total (considerando impermeabilização, manta geotêxtil de poliéster, argila expandida e substrato; e desconsiderando a estrutura da laje).

Figura 4: Energia embutida dos materiais de construção do cenário 1 (a), e do cenário 2 (b)





Fonte: os autores.

Ao considerar apenas a EE durante a etapa de demolição, a somatória dos valores da tinta e do tijolo cerâmico representam cerca de 81% do total. Na etapa de readequação, os principais contribuintes com a EE foram a madeira laminada colada (29%), a cobertura verde (25%), os painéis fotovoltaicos (17%), o tijolo cerâmico (9%) e a tinta (9%), devido à quantidade de materiais necessários ao *retrofit* e aos valores de EE.

CONCLUSÕES

O estudo de caso comparou de forma quantitativa a energia embutida associada aos materiais de construção utilizados em dois cenários de edificação. O cenário 1 considerou uma construção nova convencional similar a uma edificação comercial existente, localizada na região central de Curitiba-PR, concluída em 1975. Para isso, foi adotado o projeto padrão da NBR 12721 [10]. Para o cenário 2, foi desenvolvido um projeto hipotético de *retrofit* dessa edificação, adicionando soluções construtivas com critérios de sustentabilidade.

A partir dos resultados demonstrados, verificou-se que o projeto de *retrofit* que agregou soluções sustentáveis à edificação (cobertura verde, painéis fotovoltaicos, fachada verde e madeira laminada colada) apresentou redução de 3.558,55 GJ de EE em comparação com uma construção nova convencional, considerando as etapas de readequação e demolição no cenário 2. Ao considerar apenas a EE do processo de readequação e do transporte do material demolido no cenário 2 − tendo em vista que não existe consenso na literatura quanto às etapas do ciclo de vida do edifício a serem consideradas − a comparação de EE do projeto de *retrofit* em relação a uma construção nova convencional equivale à redução de 6.121,04 GJ.

Com relação à contribuição de EE por material, foi possível destacar o impacto dos materiais que compõem a estrutura e a vedação de sistemas construtivos convencionais, como concreto, tijolo cerâmico e tinta. A partir da análise da contribuição por material, ressalta-se a importância da seleção dos materiais de construção para projetos de *retrofit*. Destaca-se ainda, que apesar de algumas das soluções propostas para o *retrofit*, como a cobertura verde, apresentarem elevado valor de EE por unidade, a literatura indica que essas medidas promovem economias significativas durante a fase operacional. Assim, essas soluções podem reduzir a energia consumida ao longo de todo o ciclo de vida energético da edificação, além de promover benefícios ambientais e sociais. Destaca-se que nesse estudo, as fases de operação, manutenção e fim de vida não foram abordadas. Entretanto, ressalta-se a importância de uma análise mais abrangente em trabalhos futuros, englobando todas as etapas do ciclo de vida, a fim de verificar a energia consumida ao longo de toda a vida útil das edificações.

Assim, conclui-se, a partir deste estudo de caso, a viabilidade de *retrofit* de edificações comerciais de padrão similar desocupadas utilizando estratégias sustentáveis em comparação com construções novas convencionais do ponto de vista da energia embutida dos materiais. O estudo busca incentivar a ocupação de edificações sem uso a partir do *retrofit*, a fim de reduzir a necessidade de extração de recursos e produção de materiais de construção, que envolvem impactos ambientais, além de promover melhorias no entorno como a revitalização de centros urbanos, circulação de novos usuários e em consequência, a segurança do ambiente urbano construído.

Por fim, entende-se que o estudo desenvolvido possibilita desdobramentos para novos projetos de *retrofit* e pode auxiliar gestores em tomada de decisões para utilização de soluções construtivas mais sustentáveis. Para trabalhos futuros, além de englobar todas as etapas do ciclo de vida na análise de energia, sugere-se também realizar uma análise do custo do ciclo de vida para ambas as soluções.

REFERÊNCIAS

[1] UNEP, U.N.E.P. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction**, 2020.

[2] EPE, E. de P.E. **Ações para Promoção da Eficiência Energética nas Edificações Brasileiras**: No Caminho da Transição Energética, 2020.

[3] RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K.K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592-1600, 2010.

[4] KARIMPOUR, M.; BELUSKO, M.; XING, K.; BRUNO, F. Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. **Building and Environment**, v. 73, p. 106-114, 2014.

[5] TAVARES, S.F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 225 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

[6] SARTORI, T.; CALMON, J.L. Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 158-172, 2019.

[7] ALLA, S.A.; BIANCO, V.; TAGLIAFICO, L.A.; SCARPA, F. Life-cycle approach to the estimation of energy efficiency measures in the buildings sector. **Applied Energy**, v. 264, p. 114745, 2020.

[8] BIN, G.; PARKER, P. Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home–The REEP House. **Applied Energy**, v. 93, p. 24-32, 2012.

[9] UHMANN, I.M.S. **Readequação de coberturas através da técnica de telhados verdes: estudo de caso nas escolas públicas do estado do Paraná**. 2016. 134 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

[10] ABNT. **NBR 12712**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

[11] KARACHALIOU, P.; SANTAMOURIS, M.; PANGALOU, H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 256-264, 2016.

[12] FOX, M.; MOREWOOD, J.; MURPHY, T.; LUNT, P.; GOODHEW, S. Living wall systems for improved thermal performance of existing buildings. **Building and Environment**, v. 207, p. 108491, 2022.

[13] AKWA, J.V.; KONRAD, O.; KAUFMANN, G.V.; MACHADO, C.A. Evaluation of the photovoltaic generation potential and real-time analysis of the photovoltaic panel operation on a building facade in southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 69, p. 426-433, 2014.

[14] ŽEMAITIS, P.; LINKEVIČIUS, E.; ALEINIKOVAS, M.; TUOMASJUKKA, D. Sustainability impact assessment of glue laminated timber and concrete-based building materials production chains–A Lithuanian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, p. 129005, 2021.

[15] REIS, D. C.; JOHN, V. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: Concreto. São Paulo: Sidac, 2022.

[16] BELIZARIO-SILVA, F., OLIVEIRA, L. A., JOHN, V. M. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cimento. São Paulo: SIDAC, 2022.

[17] TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. Índices de CO2 para materiais de construção em edificações brasileiras. In: SBE16 BRAZIL & PORTUGAL, 2016, Vitória. **Proceedings [...]** Vitória: 2016. p. 927-936.

[18] CLETO, F. R.; VON MÜHLEN, J. F.; BELIZARIO-SILVA, F. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: blocos e telhas cerâmicos. São Paulo: SIDAC, 2022.

[19] LOPES, T.V. **Telhado verde, energia embutida e emissão de CO_2**: Uma análise comparativa a sistemas de cobertura convencionais. 2014. 93 p. Monografia (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

[20] WONG, J.H.; ROYAPOOR, M.; CHAN, C.W. Review of life cycle analyses and embodied energy requirements of single-crystalline and multi-crystalline silicon photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 608-618, 2016.

[21] OLIVEIRA, L.B. **A influência do sistema de fachada viva em manta no ciclo de vida energético de uma residência unifamiliar em clima tropical**. 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

[22] HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of carbon & energy (ICE) version 2.0**, 2011.