XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8256

Influência de Agregados Reciclados na Eficiência Energética Operacional de Edificações Sustentáveis

Influence of Recycled Aggregates on the Operational Energy Efficiency of Sustainable Buildings

José Ricardo Guimarães Corrêa Junior
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | josericardoguimcorrea@gmail.com
Leandro Moreira de Queiroz
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | pinheiro.queiroz@gmail.com
Pedro Henrique Pinheiro de Sousa
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | eng.pedro21@gmail.com
Michele Tereza Marques Carvalho
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | micheletereza@unb.br

Resumo

O estudo investiga a influência do uso de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição na eficiência térmica de edificações sustentáveis. Para isso, foram realizadas simulações energéticas no software *EnergyPlus*, considerando um modelo de edificação localizado em Brasília-DF, com parâmetros térmicos obtidos a partir da literatura. Foram comparados sistemas construtivos com materiais cimentícios convencionais e reciclados. Os resultados indicaram que a substituição parcial de agregados naturais por reciclados, restrita à argamassa e ao concreto, não ocasionou alterações significativas no desempenho térmico da edificação, tanto em termos de consumo energético quanto de variação da temperatura interna. Como a substituição abrangeu apenas parte dos elementos construtivos, esse resultado já era esperado e indica que o uso desses materiais pode contribuir para práticas mais sustentáveis na construção civil sem prejuízo da eficiência térmica.

Palavras-chave: Agregados reciclados. Eficiência energética. Construção sustentável. Simulação energética. Desempenho térmico.

Abstract

This study analyzes the influence of using recycled aggregates from construction and demolition waste on the thermal efficiency of sustainable buildings. Energy simulations were carried out using the EnergyPlus software, considering a building model located in Brasília, Brazil, with thermal parameters obtained from the literature. Construction systems with conventional and recycled cementitious materials were compared. The results indicated that the partial replacement of natural aggregates with recycled ones, restricted to the mortar and concrete, did not cause significant changes in the building's thermal performance, either in terms of energy consumption or indoor temperature variation. As the replacement covered only part of the building elements, this result was expected and indicates that the use of these materials can contribute to more sustainable practices in the construction sector without impairing thermal efficiency.

Keywords: Recycled aggregates. Energy efficiency. Sustainable construction. Energy simulation. Thermal performance.

CORRÊA JUNIOR, J. R. G.; QUEIROZ, L. M.; SOUSA, P. H. P.; CARVALHO, M. T. M. Influência de Agregados Reciclados na Eficiência Energética Operacional de Edificações Sustentáveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

A busca por práticas construtivas mais sustentáveis tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada pela crescente preocupação com os impactos ambientais associados ao setor da construção [1][2][3]. Esse setor destaca-se como um dos maiores consumidores de recursos naturais e energia, além de ser responsável por significativa geração de resíduos sólidos [3][4][5][6]. Em 2023, por exemplo, o setor de edificações e construção respondeu por cerca de 32% do consumo global de energia e por 34% das emissões globais de CO2 relacionadas à energia [3]. Adicionalmente, a elevada produção de resíduos, como materiais provenientes de demolições, agrava os problemas ambientais [7].

Nesse contexto, a necessidade de mitigar tais impactos tem incentivado o desenvolvimento de soluções como o uso de materiais reciclados [7][8]. A utilização de resíduos de PET e agregados reciclados oriundos de resíduos de construção e demolição (RCD) surge como uma alternativa para reduzir a exploração de recursos naturais e minimizar o descarte inadequado de resíduos [7]. Esses materiais podem ser incorporados à produção de concreto e argamassa, reduzindo a demanda por agregados naturais e os impactos ambientais associados à sua extração e transporte [9][10][11].

Além dos benefícios ambientais, a incorporação de agregados reciclados pode influenciar as propriedades térmicas dos materiais de construção, afetando diretamente o desempenho energético das edificações [2][8][11]. A eficiência térmica é um fator essencial para reduzir o consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa [2][3][12], uma vez que materiais com melhor desempenho térmico podem diminuir a necessidade de sistemas de climatização e, consequentemente, os custos operacionais [6][8].

Diversos estudos têm investigado o uso de diferentes tipos de agregados reciclados em materiais de construção, incluindo resíduos de concreto, cerâmica, borracha e resíduos industriais [8][9][10][11][12]. Os resultados indicam que a substituição de agregados naturais por reciclados pode alterar propriedades térmicas do concreto, como condutividade térmica, capacidade térmica e inércia térmica[8][11].

A condutividade térmica representa a capacidade do material de transmitir calor, sendo que valores menores indicam melhor isolamento térmico [8][9]. Já a capacidade térmica, relacionada ao armazenamento de calor, e a inércia térmica, associada à resistência às variações de temperatura, são propriedades fundamentais para reduzir as oscilações térmicas internas ao longo do dia, o que favorece o conforto térmico dos usuários [13][14][15].

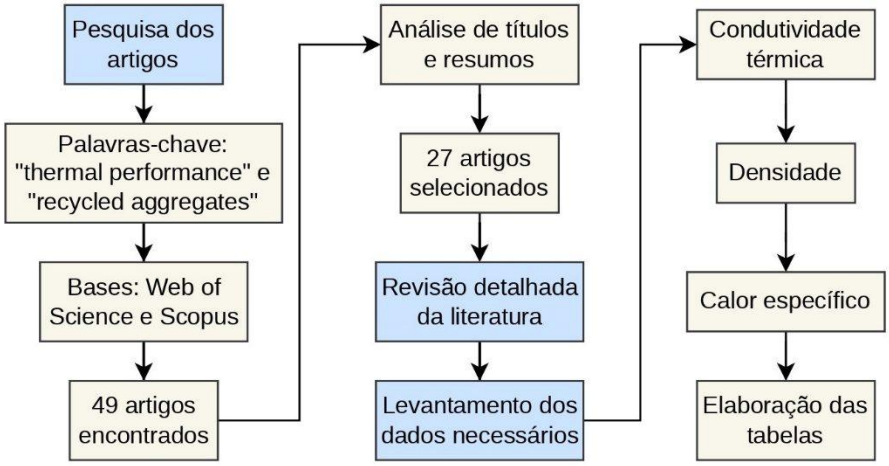
Nesse sentido, considerando os fatores mencionados, o presente artigo tem como objetivo avaliar a influência do uso de agregados reciclados de construção e demolição e de resíduos de PET na eficiência energética de uma edificação, por meio de simulação termoenergética. Para tanto, aborda-se tanto os aspectos ambientais relacionados à utilização de agregados reciclados quanto os efeitos dessa prática nas propriedades térmicas, como condutividade térmica e capacidade térmica.

METODOLOGIA

Para efetuar este estudo, foi conduzido um mapeamento sistemático da literatura, o qual, conforme descrito por Afzal, Shafiq e Jassmi [16], constitui-se como um método de pesquisa que emprega uma metodologia claramente estabelecida para detectar, examinar e compreender todas as evidências acessíveis sobre um tema de pesquisa específico de forma imparcial e reprodutível.

A coleta de dados foi dividida em três etapas: pesquisa dos artigos, revisão detalhada da literatura e levantamento dos dados, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Organograma da metodologia.



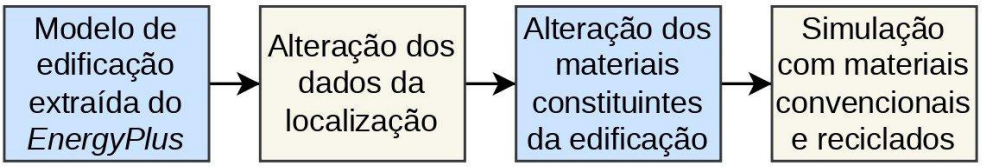
Fonte: o autor.

Por meio do acesso ao Portal de Periódicos CAPES/MEC, foram consultadas referências internacionais nas bases de dados "*Web of Science*" e "*Scopus*". Em ambas as plataformas, utilizaram-se as palavras-chave "thermal performance" e "*recycled aggregates*", combinadas pelo operador booleano *AND*, resultando na estratégia de busca "*thermal performance*" *AND* "*recycled aggregates*", que retornou 49 artigos.

A simulação energética foi realizada com o software *EnergyPlus*, amplamente utilizado por engenheiros, arquitetos e pesquisadores para modelar o consumo de energia em edificações, incluindo aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e uso de água. O procedimento adotado está apresentado na Figura 2 e baseou-se em um modelo de edificação disponibilizado pelo próprio desenvolvedor do software, posteriormente adaptado às condições locais.

Conforme ilustrado na Figura 2, o método consistiu na utilização desse modelo base, com modificações nos dados de localização e nos materiais de construção empregados. O estudo concentrou-se em materiais cimentícios, realizando simulações com concretos e argamassas convencionais e reciclados. As principais propriedades consideradas foram densidade, condutividade térmica e calor específico, obtidas das normas NBR 15220-2:2005 (Anexo B) [28] e NBR 12655:2022 para materiais convencionais, e de artigos científicos para os materiais reciclados, sendo os valores do resíduo de PET extraídos de Kunthawatwong et al. [20].

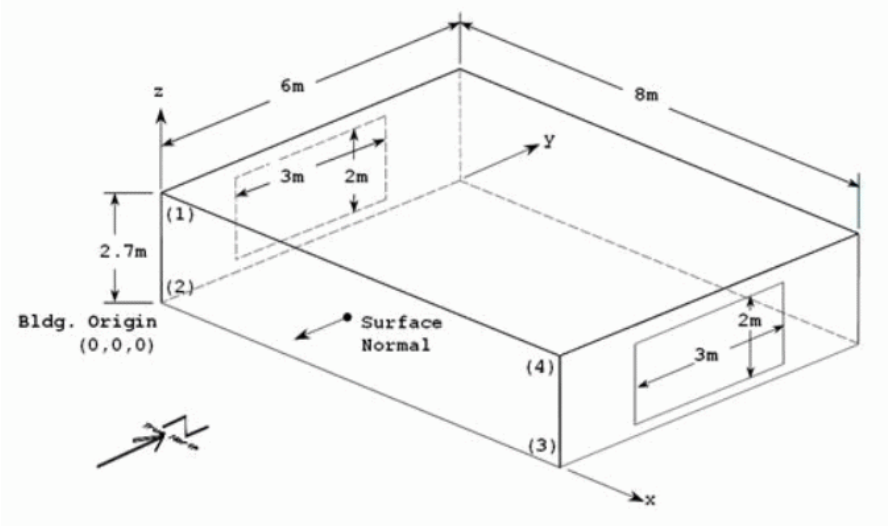
Figura 2: Fluxograma da simulação realizada.



Fonte: o autor.

O caso de estudo localiza-se em Brasília–DF e corresponde a uma edificação comercial destinada ao uso como escritório. A construção consiste em um edifício térreo, de planta retangular, com área de 48,00 m², configurado como um ambiente único, sem divisórias internas. A edificação possui duas janelas, população de ocupação estimada em seis pessoas e horário de funcionamento das 8h às 18h, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Modelo de edificação utilizada na simulação.



Fonte: o autor.

A configuração dos materiais adotada considerou paredes em alvenaria de tijolos cerâmicos revestidas com argamassa de 2,5 cm em ambas as faces, piso em concreto de 10 cm com revestimento cerâmico, janelas de vidro cristal de 3 mm e cobertura em telha cerâmica com forro em PVC. A argamassa foi produzida com traço 1:2,75 (agl:areia), contendo 20% de substituição da areia por PET, em forma granular (partículas/grânulos de PET reciclado triturado, com granulometria semelhante à da areia). O concreto foi executado com traço 1:2,94:4,67 (agl:areia:agregado graúdo), fator água/agl de 0,57 e substituição de 25% do cimento por pó de concreto reciclado (GRC) e de 50% do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado misto (MRA).

O estudo de caso teve como objetivo avaliar a influência da substituição de agregados e de parte do cimento, por materiais reciclados no desempenho térmico e na eficiência energética da edificação, comparando dois sistemas construtivos que diferem apenas nos materiais cimentícios. A Tabela 1 apresenta os elementos construtivos de cada

sistema e suas propriedades térmicas consideradas na simulação, com foco na comparação do consumo energético em termos monetários.

Tabela 1: Propriedades dos materiais cimentícios utilizados na simulação

Material	Densidade de massa aparente (Kg/m^3)	Condutividade térmica (W/-K)	Calor específico (J/Kg-K)	Fonte
Argamassa	1800 - 2100	1,15	1,0	NBR 15220-2:2005 (Anexo B) [28]
Concreto	2200 - 2400	1,75	0,8 - 1,2	NBR 15220-2:2005 (Anexo B) [28]
Pó de concreto reciclado como substituição parcial do cimento	1800 - 2200	1,41 – 1,69	0,8 - 0,9	Cantero et al. [29]
Resíduos de PET reciclados em argamassas de geopolímero e cimento	1585 – 2042	0,6329 – 2,0030	-	Kunthawatwong et al. [20]

Fonte: adaptado de ABNT NBR 15220-2 (2005), ABNT NBR 12655 (2022), Cantero et al. e Kunthawatwong et al.

Para as simulações, adotaram-se os maiores valores estabelecidos pela NBR 15220-2:2005 (Anexo B) [28] para densidade e calor específico do concreto e da argamassa convencionais. Para o pó de concreto reciclado (GRC), utilizaram-se os maiores valores de densidade, calor específico e condutividade térmica apresentados na Tabela 1, extraídos de Cantero et al. [29]. No caso da argamassa com resíduo de PET, foram considerados os maiores valores de densidade e condutividade térmica obtidos de Kunthawatwong et al. [20] e apresentados na Tabela 1. Como não havia valor específico para o calor específico dessa argamassa, manteve-se o mesmo valor adotado para a argamassa convencional.

O estudo de caso foi conduzido no software *EnergyPlus 9.4.0*, desenvolvido com apoio do *Building Technologies Office (BTO)* do *Department of Energy (DOE)* dos Estados Unidos e integrado ao conjunto de ferramentas de modelagem energética que inclui o *OpenStudio*. A simulação utilizou o arquivo *BRA_Brasilia.833780_SWERA.epw*, disponibilizado pelo próprio software. O modelo foi configurado para representar as condições climáticas de Brasília (DF, Brasil) e o padrão de ocupação da edificação. Consideraram-se carga interna de iluminação de 250 W, temperatura de aquecimento de 20 °C e de resfriamento de 24 °C. A simulação foi realizada para um período anual, adotando-se temperatura do solo entre 19,4 °C e 22,36 °C. Para a análise econômica, foi considerado o custo da energia elétrica de R$ 0,9129 por kWh. Essas definições permitiram representar, de forma simplificada, as condições operacionais da edificação durante as simulações energéticas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento bibliográfico foi fundamental para o desenvolvimento do estudo, pois permitiu, previamente às simulações, estabelecer parâmetros baseados em pesquisas recentes que investigam a viabilidade do uso de materiais reciclados em edificações e seus efeitos no desempenho energético. Nesse contexto, o Quadro 1 apresenta os principais resultados extraídos da revisão da literatura selecionada. Em seguida, são

apresentados, nas tabelas e discussões subsequentes, os resultados das simulações realizadas no software *EnergyPlus*.

Quadro 1: Análise de levantamento bibliográfico

Título do artigo	Autores	Ano	Principais resultados
Desempenho térmico e mecânico do concreto geopolimérico com agregado reciclado e escória de cobre como agregado fino	Sahu et al. [27]	2025	Os resultados mostraram que a incorporação de 30% de agregado reciclado e escória de cobre melhorou o desempenho térmico residual do concreto e aumentou sua resistência após exposição a altas temperaturas.
Concreto sustentável e eficiente em termos energéticos para aplicações multifuncionais	Abden et al. [17]	2024	Inclusão de agregados reciclados e PCM melhorou a capacidade térmica e a eficiência energética, reduzindo a condutividade térmica em construções.
Otimização da argamassa de alvenaria: insights experimentais sobre propriedades físico-mecânicas	Ferrández et al. [24]	2024	Argamassas com fibras naturais e agregados reciclados apresentaram menor densidade e melhor desempenho térmico, com aumento de 37,6% na resistência à flexão.
Investigação experimental e numérica sobre o desempenho térmico do concreto com agregado reciclado	Jin et al. [18]	2024	O concreto reciclado apresentou baixa condutividade térmica devido à alta porosidade, contribuindo para isolamento térmico e menor consumo energético.
Concreto com agregado reciclado reforçado com fibras naturais e sintéticas submetido ao fogo	Kanagaraj et al. [19]	2024	Fibras naturais e sintéticas adicionadas ao concreto reciclado reduziram o impacto do fogo e melhoraram o desempenho

			térmico em altas temperaturas.
Melhorando a eficiência térmica em reservatórios de água usando concreto reciclado pigmentado	López-Rebollo et al. [23]	2024	O concreto pigmentado reciclado aumentou a eficiência térmica, com tanques de água apresentando temperaturas internas até 2 °C superiores.
Análise de desempenho e custo do ciclo de vida do concreto reciclado utilizando agregado de tijolo cerâmico residual	Zhang et al. [22]	2024	Agregados de tijolo reciclado reduziram a condutividade térmica do concreto, com impacto positivo na eficiência energética e viabilidade econômica.
Agregados para uso inovador em painéis de concreto pré-moldado	Puppio et al. [10]	2023	Agregados reciclados melhoraram a performance térmica em painéis de concreto pré-moldados, mantendo resistência estrutural adequada.
Blocos de concreto impressos em 3D feitos com material reciclado sustentável	Volpe et al. [21]	2023	Blocos impressos em 3D usando agregados reciclados demonstraram flexibilidade no ajuste de propriedades térmicas através do design de componentes.
Viabilidade experimental da incorporação de agregados de resíduos sólidos em blocos vazados de alvenaria	Al Fakhoury et al. [25]	2022	Blocos ocos com resíduos sólidos apresentaram resistência térmica de até 0.266 m²K/W, superior aos blocos convencionais, mas menor resistência estrutural.
Comportamento à compressão excêntrica de colunas de concreto com agregado reciclado após	Chen et al. [7]	2022	A alta porosidade dos agregados reciclados melhorou o isolamento térmico, embora tenha reduzido a resistência

exposição a altas temperaturas			compressiva após exposição a altas temperaturas.
Propriedades térmicas e de resistência à compressão do concreto leve não estrutural contendo subprodutos industriais	Farina et al. [26]	2022	O concreto leve produzido com subprodutos industriais apresentou até 25% de melhoria na eficiência térmica, embora a resistência mecânica tenha diminuído em ~30%.
Melhoria das propriedades térmicas e mecânicas do concreto usando resíduos cerâmicos	Gharibi et al. [8]	2022	Resíduos cerâmicos reduziram a condutividade térmica em até 48%, contribuindo para o isolamento térmico e a sustentabilidade na construção.
Resíduos de PET reciclado como agregado miúdo em argamassas geopoliméricas de cinzas volantes e cimento	Kunthawatwong et al. [20]	2022	Resíduos de PET reduziram a densidade e a condutividade térmica do concreto, promovendo melhor isolamento térmico.
Desempenho higrotérmico de painéis sanduíche ventilados pré-fabricados com agregados reciclados	Bagarić et al. [9]	2020	Painéis ventilados de concreto reciclado tiveram melhor desempenho térmico e controle de umidade em climas extremos.

Fonte: o autor.

A análise do Quadro 1 indica que diversos estudos apontam que a incorporação de agregados reciclados em concretos contribui para aumentar a sustentabilidade sem comprometer significativamente suas propriedades mecânicas. O estudo de Abden *et al.* [17] mostra que o uso de agregados reciclados associado a materiais de mudança de fase (PCM) melhora a eficiência térmica e reduz a pegada de carbono do concreto. De forma semelhante, López-Rebollo et al. [23] destacam que agregados reciclados pigmentados podem influenciar positivamente a absorção térmica, favorecendo a eficiência energética das edificações.

Outros estudos também evidenciam melhorias nas propriedades térmicas e de isolamento. Sahu *et al.* [27] observaram que concretos geopoliméricos contendo agregados reciclados apresentaram melhoria no desempenho térmico residual e na resistência após exposição a altas temperaturas, indicando potencial para aplicações sustentáveis em edificações. De maneira complementar, Ferrández *et al.* [24] relatam que o uso de fibras naturais e agregados reciclados pode melhorar a resistência mecânica e a durabilidade das argamassas.

A eficiência térmica destaca-se como um ponto comum entre os estudos. Enquanto Abden *et al.* [17] relatam maior retenção térmica com o uso de PCM, Jin *et al.* [18] observam que concretos com agregados reciclados apresentam baixa condutividade térmica, característica que pode contribuir para a redução da demanda energética em edificações.

Em conjunto, esses resultados indicam uma tendência de desenvolvimento de materiais que conciliam desempenho mecânico adequado e melhoria da eficiência energética. Entretanto, ainda persistem desafios, como a variabilidade das propriedades dos materiais reciclados, a necessidade de otimização das dosagens [30] e a avaliação do desempenho e da durabilidade desses materiais a longo prazo [31].

Os resultados das simulações realizadas no EnergyPlus indicaram valores totais de consumo de energia elétrica semelhantes para os sistemas com materiais cimentícios convencionais, conforme Quadro 2, e com agregados reciclados, conforme Quadro 3. Para essas simulações, foram adotados os valores superiores dos intervalos de propriedades térmicas apresentados na Tabela 1, cujos demais parâmetros estão descritos na seção de metodologia.

Quadro 2: Consumo total de energia para materiais cimentícios convencionais.

	Energia Total [kWh]	Energia por área total de construção [kWh/m²]	Energia por área de construção condicionada [kWh/m²]
Energia total do local	4153.70	86.56	86.54
Energia líquida do site	4153.70	86.54	86.54
Fonte total de energia	13154.77	274.06	274.06
Fonte líquida de energia	13154.77	274.06	274.06

Fonte: o autor.

Quadro 3: Consumo total de energia para materiais cimentícios reciclados.

	Energia Total [kWh]	Energia por área total de construção [kWh/m²]	Energia por área de construção condicionada [kWh/m²]
Energia total do local	4153.70	86.56	86.54
Energia líquida do site	4153.70	86.54	86.54
Fonte total de energia	13154.77	274.06	274.06
Fonte líquida de energia	13154.77	274.06	274.06

Fonte: o autor.

Os quadros 4 e 5 apresentam os custos mensais de energia, os quais foram semelhantes para os sistemas com materiais cimentícios convencionais e reciclados.

Quadro 4: Custo anual de energia por sistema e por mês para materiais cimentícios convencionais.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Soma	Total
Cobrança de energia (R$)	368.09	327.27	381.36	284.33	314.24	231.79	247.14	312.09	365.93	383.44	322.97	253.97	3792.26	383.44
Base (R$)	368.09	327.27	381.36	284.33	314.24	231.79	247.14	312.09	365.93	383.44	322.97	253.97	3792.26	383.44
Subtotal (R$)	368.09	327.27	381.36	284.33	314.24	231.79	247.14	312.09	365.93	383.44	322.97	253.97	3792.26	383.44
Impostos (R$)	133.58	118.76	138.39	103.18	114.03	84.11	89.69	113.26	132.79	139.14	117.20	92.03	1376.17	139.14
Total (R$)	446.03	519.75	387.51	428.27	315.90	336.83	336.83	425.35	498.72	522.58	440.17	345.65	5168.43	522.58

Fonte: o autor.

Quadro 5: Custo anual de energia por sistema e por mês para materiais cimentícios reciclados.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Soma	Total
Cobrança de energia (R$)	368.09	327.27	381.36	284.33	314.24	231.79	247.14	312.09	365.93	383.44	322.97	253.97	3792.26	383.44
Base (R$)	368.09	327.27	381.36	284.33	314.24	231.79	247.14	312.09	365.93	383.44	322.97	253.97	3792.26	383.44
Subtotal (R$)	368.09	327.27	381.36	284.33	314.24	231.79	247.14	312.09	365.93	383.44	322.97	253.97	3792.26	383.44
Impostos (R$)	133.58	118.76	138.39	103.18	114.03	84.11	89.69	113.26	132.79	139.14	117.20	92.03	1376.17	139.14
Total (R$)	446.03	519.75	387.51	428.27	315.90	336.83	336.83	425.35	498.72	522.58	440.17	345.65	5168.43	522.58

Fonte: o autor.

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, a substituição de materiais convencionais por reciclados não resultou em variações no consumo de energia elétrica entre os dois cenários analisados. Para ambas as configurações de materiais cimentícios, verificou-se que o consumo energético foi idêntico, indicando que, no contexto da edificação simulada, a utilização de agregados reciclados não alterou o desempenho energético do edifício. Dessa forma, os resultados sugerem que o comportamento térmico dos materiais cimentícios com agregados reciclados não foi suficiente para provocar alterações perceptíveis na eficiência energética da edificação. Cabe esclarecer que, embora tenham sido atribuídas propriedades térmicas distintas aos materiais convencionais e reciclados nas duas simulações, os valores de consumo obtidos foram idênticos na precisão reportada pelo software, uma vez que a pequena diferença entre essas propriedades, associada ao volume reduzido de material substituído, não foi suficiente para alterar o resultado.

Embora a literatura indique que a incorporação de agregados reciclados pode influenciar as propriedades térmicas dos materiais cimentícios, é importante destacar

que, neste estudo, a substituição se restringiu a intervenções pontuais, especificamente na argamassa e no concreto de pilares e vigas. Dado o limitado volume de material substituído em relação ao conjunto da edificação, as diferenças entre as situações simuladas, materiais convencionais e materiais com agregados reciclados, não resultaram em qualquer impacto no consumo de energia, em consonância com a ausência de variação já apontada. Ainda assim, o uso de agregados reciclados apresenta benefícios ambientais importantes, como a redução do volume de resíduos da construção civil e da necessidade de extração de recursos naturais. Esse ganho, associado à não modificação das propriedades térmicas do material, torna a substituição uma grande aliada.

A adoção desses materiais pode contribuir para práticas construtivas mais sustentáveis, reduzindo os impactos ambientais associados à produção e ao descarte de materiais tradicionais. Além disso, em algumas regiões, a implementação de soluções baseadas em materiais reciclados pode estar associada a incentivos e políticas voltadas à promoção da construção sustentável.

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo indicaram que a substituição de materiais convencionais por agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e por resíduos de PET não comprometeu a eficiência energética da edificação analisada. A avaliação das propriedades térmicas, como condutividade e capacidade térmica, mostrou que as variações observadas não resultaram em impactos significativos no desempenho térmico. Como as condições térmicas se mantêm equivalentes às da construção convencional, conclui-se que a substituição não acarreta prejuízos ao comportamento térmico da edificação originalmente projetada, evidenciando a viabilidade técnica e sustentável desses materiais.

Além disso, considerando que uma edificação construída com materiais convencionais atenderia aos requisitos térmicos da NBR 15575:2024, como os limites de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico, a equivalência de propriedades observada ao se substituírem esses materiais pelos compósitos com agregados reciclados indica que tal substituição não comprometeria o atendimento a esses critérios. Ressalta-se, contudo, que esses limites normativos não foram calculados neste estudo, cuja análise se concentrou no consumo energético e no custo operacional da edificação. O consumo total de energia do local, de 4153,70 kWh, manteve-se idêntico entre os cenários simulado e de referência, reforçando que a substituição não alterou o desempenho energético da edificação. Esse resultado evidencia a viabilidade técnica dos agregados reciclados como alternativa sustentável.

Esses resultados reforçam a relevância do uso de resíduos na construção civil, contribuindo para a redução da extração de recursos naturais e para a minimização dos impactos ambientais. Contudo, o estudo considerou um conjunto específico de variáveis. Dessa forma, pesquisas futuras podem investigar o comportamento desses materiais em diferentes tipologias construtivas, orientações solares e zonas climáticas, além de avaliar outros tipos de resíduos com potencial de aplicação na construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF/Brasil).

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, todos os autores utilizaram o ChatGPT (OpenAI, modelo GPT-5.5) para revisão textual, aprimoramento da redação acadêmica e melhoria da coesão e da clareza do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Mineral commodity summaries 2015. Washington: U.S. Geological Survey, 2015.

[2] ROBATI, Mehdi; MCCARTHY, Timothy J.; KOKOGIANNAKIS, Georgios. Incorporating environmental evaluation and thermal properties of concrete mix designs. Construction and Building Materials, v. 128, p. 422–435, 2016.

[3] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: not just another brick in the wall. Nairobi: UNEP, 2025. DOI: 10.59117/20.500.11822/47214.

[4] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Use of air conditioning in the Brazilian residential sector: perspectives and contributions to advances in energy efficiency. Brasília: MME, 2018.

[5] BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the ecoefficiency improvement potential. Building and Environment, v. 46, 2011.

[6] RESENDE, Douglas Mol; MENDES, Vitor Freitas; CARVALHO, Victor Rezende; NOGUEIRA, Marcela Aguiar; CARVALHO, José Maria Franco de; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Coating mortars produced with recycled PET aggregates: A technical, environmental, and socioeconomic approach applied to Brazilian social housing. Journal of Building Engineering, v. 83, p. 108426, 2024.

[7] CHEN, Zongping; LIAO, Haoyu; ZHOU, Ji; YE, Peihuan. Eccentric compression behavior of reinforced recycled aggregate concrete columns after exposure to elevated temperatures: experimental and numerical study. Structures, v. 43, p. 959–976, 2022.

[8] GHARIBI, Hamed; MOSTOFINEJAD, Davood; BAHMANI, Hadi; HADADZADEH, Hassan. Improving thermal and mechanical properties of concrete by using ceramic electrical insulator waste as aggregates. Construction and Building Materials, v. 338, p. 127647, 2022.

[9] BAGARIĆ, Marina; BANJAD PEČUR, Ivana; MILOVANOVIĆ, Bojan. Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste: a case study. Energy & Buildings, v. 206, p. 109573, 2020.

[10] PUPPIO, M. L.; COCCU, F.; USMAN, A.; VALDÉS, M.; FRATTOLILLO, A.; SASSU, M. Aggregates for innovative use in precast concrete panels: state of the art and

perspectives. In: BIONDINI, Fabio; FRANGOPOL, Dan (Eds.). Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems. 1. ed. Taylor & Francis, 2023. DOI: 10.1201/9781003323020-306.

[11] BRAVO, Miguel; DE BRITO, Jorge; EVANGELISTA, Luís. Thermal performance of concrete with recycled aggregates from CDW plants. Applied Sciences, v. 7, n. 740, p. 1–20, 2017.

[12] WANG, Junqiang; DU, Bin. Experimental studies of thermal and acoustic properties of recycled aggregate crumb rubber concrete. Journal of Building Engineering, v. 32, p. 101836, 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101836.

[13] ASADI, I.; SHAFIGH, P.; ABU HASSAN, Z. F. B.; MAHYUDDIN, N. B. Thermal conductivity of concrete: a review. Journal of Building Engineering, v. 20, p. 81–93, 2018.

[14] MARIE, I. Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate rubberized concrete. Construction and Building Materials, v. 133, p. 516–524, 2017.

[15] WANG, W.; ZHAO, L.; LIU, Y.; LI, Z. Mix design for recycled aggregate thermal insulation concrete with mineral admixtures. Magazine of Concrete Research, v. 66, n. 10, p. 492–504, 2014.

[16] AFZAL, M.; SHAFIQ, M. T.; JASSMI, H. A. Improving construction safety with virtual-design construction technologies: a review. Journal of Information Technology in Construction, v. 26, p. 319–340, 2021.

[17] ABDEN, Md Jaynul; TAM, Vivian W. Y.; AFROZE, Jannatul Dil; et al. Energy efficient sustainable concrete for multifunctional applications. Construction and Building Materials, v. 418, p. 135213, 2024.

[18] JIN, Libing; WANG, Yuhang; WU, Qiang; et al. Experimental and numerical investigation on the thermal performance of recycled aggregate concrete. Case Studies in Thermal Engineering, v. 60, p. 104727, 2024.

[19] KANAGARAJ, Balamurali; SHAJI, Shinu; JAFRIN, Meshach; et al. Natural and synthetic fiber reinforced recycled aggregate concrete subjected to standard fire temperature. Heliyon, v. 10, n. 21, p. e39676, 2024.

[20] KUNTHAWATWONG, Ronnakrit; SYLISOMCHANH, Lattana; PANGDAENG, Saengsuree; et al. Recycled Non-Biodegradable polyethylene terephthalate waste as fine aggregate in fly ash geopolymer and cement mortars. Construction and Building Materials, v. 328, p. 127084, 2022.

[21] VOLPE, Stelladriana; SANGIORGIO, Valentino; PETRELLA, Andrea; et al. 3D printed concrete blocks made with sustainable recycled material. VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability, v. 8, p. 70–83, 2023.

[22] ZHANG, Shiping; NIU, Longlong; LI, Yanbo; et al. Performance and Life Cycle Cost Analysis of Recycled Concrete Utilising Waste Clay Brick. Waste and Biomass Valorization, p. 1–14, 2024.

[23] LÓPEZ-REBOLLO, Jorge; MARTÍN-NIETO, Ignacio; SÁEZ BLÁZQUEZ, Cristina; DEL POZO, Susana; GONZÁLEZ-AGUILERA, Diego. Enhancing thermal efficiency in water storage tanks using pigmented recycled concrete. Materials, v. 17, n. 5, p. 1008, 2024. DOI: 10.3390/ma17051008.

[24] FERRÁNDEZ, Daniel; ZARAGOZA-BENZAL, Alicia; PASTOR-LAMBERTO, Rocío; SANTOS, Paulo; MICHALAK, Jacek. Optimizing masonry mortar: experimental insights into physico-mechanical properties using recycled aggregates and natural fibers. Applied Sciences, v. 14, n. 14, p. 6226, 2024. DOI: 10.3390/app14146226.

[25] AL FAKHOURY, Joelle; SASSINE, Emilio; CHERIF, Yassine; DGHEIM, Joseph; ANTCZAK, Emmanuel. Experimental feasibility for the incorporation of solid waste aggregates in masonry hollow blocks. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021.

[26] FARINA, Ilenia; MOCCIA, Ivan; SALZANO, Cinzia; SINGH, Narinder; SADROLODABAEE, Payam; COLANGELO, Francesco. Compressive and thermal properties of non-structural

lightweight concrete containing industrial byproduct aggregates. Materials, v. 15, n. 11, p. 4029, 2022. DOI: 10.3390/ma15114029.

[27] SAHU, A.; KUMAR, P.; PRATAP, B.; GOGINENI, A.; SEMBETA, R. Y. Thermal and mechanical performance of geopolymer concrete with recycled aggregate and copper slag as fine aggregate. Scientific Reports, v. 15, n. 1, art. 28968, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-15153-y.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

[29] CANTERO, Blas; BRAVO, Miguel; DE BRITO, Jorge; SÁEZ DEL BOSQUE, Isabel Fuencisla; MEDINA, César. Thermal performance of concrete with recycled concrete powder as partial cement replacement and recycled CDW aggregate. Applied Sciences, v. 10, n. 13, p. 4540, 2020. DOI: 10.3390/app10134540.

[30] WANG, Dayang; JI, Yongcheng; XU, Wenyuan; LU, Junkai; DONG, Qingjie. Multi-objective optimization design of recycled concrete based on the physical characteristics of aggregate. Construction and Building Materials, v. 458, art. 139623, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139623.

[31] ZHANG, Hanghua; XIAO, Jianzhuang; TANG, Yuxiang; DUAN, Zhenhua; POON, Chi-Sun. Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: testing and modelling. Cement and Concrete Composites, v. 130, art. 104527, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104527.