

Simulação inteligente para redução da pegada de carbono: Integrando BIM, Power BI e custos

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.164.17>

**Thiago Melo¹, Juliana Scanoni¹,
João Carvalho¹, Amanda Pereira¹,
Bruna Forte¹, Alana Stamford¹**

¹ *TPF Engenharia, Recife, Brasil.*

Resumo

O setor da construção civil está entre os principais atores para o aquecimento global, em função das emissões excessivas de dióxido de carbono (CO₂), correspondendo a cerca de 39% do total de emissões no mundo. Nos últimos anos, tem-se estabelecido formas de mitigar os impactos provocados pelas edificações. Ações essas que, de modo geral, otimizam a fase operacional dos empreendimentos e aumentam a proporção da energia envolvida nas fases pré-operacionais, que já representam cerca de 10 a 20% da energia consumida durante todo o ciclo de vida da edificação. Desta forma, a presente pesquisa visa explorar o potencial de redução da pegada de carbono relativa à fase pré-operacional, ainda nas fases iniciais do projeto. Através da integração entre modelo BIM, Power BI e um banco de dados desenvolvido com parâmetros e premissas nacionais, é possível realizar a simulação e a análise de diversos cenários para identificar o impacto de cada escolha de soluções construtivas adotadas para a edificação. A análise é feita a partir de um conjunto de Key Performance Indicators (KPI) que relacionam custos, quantidade de carbono incorporado (CI), mostrando-se capaz de reduzir em média de 10 a 37% da quantidade de CI.

1. Introdução

A indústria da construção civil é considerada a maior geradora de impactos ambientais, pois utiliza quantidades expressivas de energia para extrair, transformar a matéria-prima e transportar o produto final até a obra, dentro dos processos de execução, manutenção e desconstrução de edifícios [1]. Os materiais de construção que mais consomem energia e emitem gases de efeito estufa (GEE) são: cimento, cal, aço, brita, areia e materiais cerâmicos, por utilizarem na sua produção a queima de combustíveis oriundos da biomassa como lenha e serragem, sendo considerada uma das indústrias com maior consumo energético e que mais emite gases. Além do consumo de energia e a emissão de CO₂ durante o processo de extração, há de se considerar o transporte desses agregados [2].

O termo carbono incorporado se refere à soma do impacto de todas as emissões de GEE atribuídas a um material ao longo de seu ciclo de vida.

É importante ressaltar que não existem muitas pesquisas atualmente abordando o período pré-operacional do ciclo de vida de uma edificação, o que ressalta o ineditismo do trabalho desenvolvido. Dentro deste contexto, a aplicação da metodologia *Building Information Modeling* (BIM) é capaz de agregar aos projetos da construção civil uma variedade de informações, além das geométricas, que conectam desde a fase conceitual com planejamento, custos e execução até o pós-obra do empreendimento [3], possibilitando uma quantificação mais ágil. Bem como, a atualização e/ou inclusão de novos componentes e modelos, garantindo escalabilidade à aplicação da ferramenta criada.

Os dados extraídos do modelo BIM são reunidos em uma ferramenta de avaliação e visualização de dados da Microsoft, o Power BI, que tem como principal objetivo permitir a navegação entre as opções de sistemas construtivos disponíveis no banco de dados estabelecido e o cálculo do KPI associado às quantidades de CO₂ e custos constatadas, facilitando a tomada de decisão em relação às escolhas de projeto e permitindo a retroalimentação do modelo.

2. Revisão da literatura

2.1. Fases da Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser definida como uma metodologia regulamentada pela ISO 14067 (2018), que é capaz de quantificar potenciais impactos ambientais. Do ponto de vista de uma edificação ou produto de construção, a ACV envolve desde a etapa de extração e produção das matérias primas até o fim de vida da edificação, conforme descrito na Figura 1.

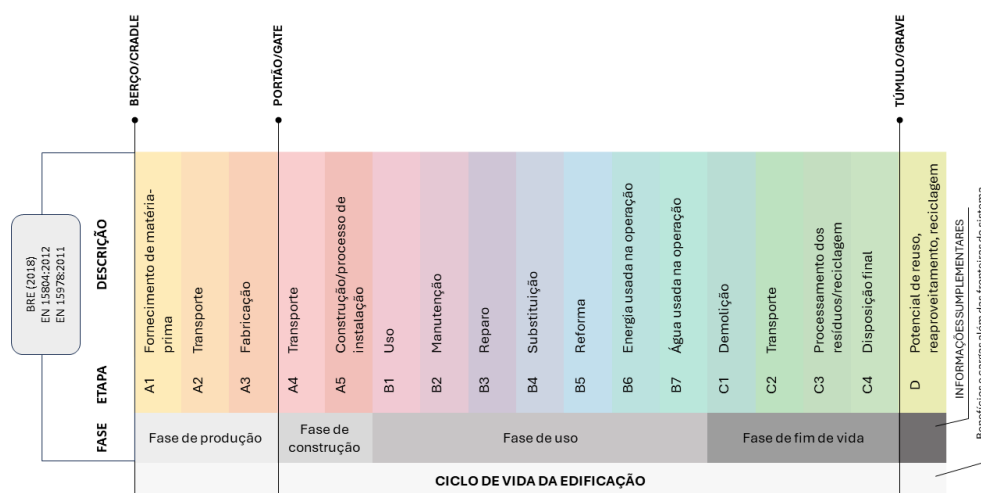


Figura 1
Descrição das etapas que constituem a ACV de uma edificação.

Fonte: Adaptado de BRE (2018) [4], EN 15978 [5]; EN 15804 [6].

Atualmente, existe uma norma específica europeia EN 15978:2011 [5] que segrega em módulos e detalha as principais etapas a serem consideradas no ciclo de vida de uma edificação. O presente estudo contempla apenas a análise do carbono incorporado nas fases de A1 a A5.

2.2. Pegada de carbono

A pegada de carbono pode ser definida como a quantificação, normalmente em toneladas (t), de emissão de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) no ciclo de vida de um dado produto, processo ou serviço. Esta informação também é utilizada no momento de idealização do projeto de compensação. De acordo com Tavares [7], a energia embutida (EE) ou energia incorporada (EI) corresponde ao conjunto de insumos energéticos, diretos e indiretos, utilizados no transporte e na fabricação de materiais utilizados na construção da edificação.

Um crédito de carbono representa uma unidade de medida que corresponde à redução ou à remoção de uma tonelada métrica de dióxido de carbono (ou gases de efeito estufa equivalentes) da atmosfera. É normalmente gerado por empresas que reduzem emissões ou removem dióxido de carbono por meio de projetos de energia renovável, iniciativas de reflorestamento ou programas de eficiência energética. Esses projetos são verificados e certificados de forma independente para garantir sua legitimidade e benefícios ambientais.

Para efetuar uma quantificação transparente dos resultados é necessário entender os impactos provocados pelos materiais produzidos. As Declarações Ambientais de Produto (DAP) ou *Environmental Product Declarations* (EPD) apresentam informações verificadas ao longo do ciclo de vida dos produtos, sendo elaboradas para todos os tipos de bens e serviços. O EPD Brasil faz parte do programa global *International EPD*

System para declarações ambientais com base na NBR ISO 14025 e na EN 15804. Atualmente, conta com a participação de 45 países e mais de 1.500 EPD em seu banco de dados.

2.3. Regionalização dos dados

A necessidade da utilização de dados regionalizados foi discutida por Oliveira [8] em que, a partir de levantamentos de processos e insumos com diferentes fábricas de agregados, constatou-se grande variabilidade entre resultados para energia incorporada e emissões de CO₂ entre empresas, concluindo a não homogeneidade de processos e insumos.

Segundo Kozloski [9], ainda existem poucos dados sobre levantamentos energéticos de materiais e processos na literatura brasileira voltados para a construção civil, e os disponíveis trazem informações insuficientes para avaliação e adoção. Desta forma, o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC) foi desenvolvido com o intuito de mudar essa realidade. Coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), financiado pelo Instrumento de Parceria da União Europeia em conjunto com o Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza, Segurança Nuclear e Defesa do Consumidor (BMUV), o SIDAC permite calcular indicadores de desempenho ambiental da extração até à transformação (A1-A3) da fábrica para produtos de construção, com base em dados brasileiros verificados.

A utilização do SIDAC como principal fonte de dados, tem por objetivo regionalizar os parâmetros de cálculo utilizados, conferindo maior confiabilidade aos dados analisados diante do cenário nacional. Entretanto, até o momento presente, a ferramenta se encontra em fase inicial de desenvolvimento (teve início em 2022), e, apesar de já contribuir fortemente com o presente trabalho, ainda deixa várias lacunas, que foram supridas com a consulta a literaturas relacionadas ao tema e a DAP de diversos fornecedores.

Como a análise, aqui proposta, conta com um binômio que correlaciona o impacto mensurado em emissões de dióxido de carbono equivalente, e os custos, a outra referência adotada para esta vertente foi o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), consolidado e aceito em todo o território brasileiro, como referência de custos e contratação pública para serviços de construção civil. O sistema conta com uma base de dados vasta que contempla, por data de aferição e localização geográfica dentro do país, serviços tradicionalmente executados em obras civis, além do descritivo dos coeficientes utilizados de mão de obra, equipamentos e insumos necessários para a realização de determinados serviços de forma unitária. A partir desta quantificação unitária do volume de material, é possível aplicar coeficientes CO_{2eq}.

3. Metodologia

A fim de ensaiar a metodologia, foi escolhida uma edificação do tipo comercial, térrea, com uma área construída de 1.368,48 m², a ser implantada na cidade de São Paulo. O projeto básico foi modelado no software Autodesk Revit, seguindo a metodologia BIM e os critérios necessários para a análise do carbono incorporado. Para a quantificação dos materiais incorporados na edificação, realizou-se a categorização em sistemas construtivos, os quais foram apresentados a partir de *dashboard* do Power BI, e listados como: paredes internas, paredes externas, piso interno, piso externo, telhado, forro e esquadrias, estas últimas subdivididas em portas e janelas.

Em paralelo, desenvolveu-se um banco de dados que relaciona informações de custos e coeficientes de emissão de carbono. Os dados relativos aos custos, bem como toda a estrutura de quantificação unitária de cada alternativa de sistema construtivo, foram gerados a partir de composições de custos unitários apresentados pelo SINAPI. E, os coeficientes de emissão de CO_{2eq} foram, também, adaptados às unidades previstas no SINAPI.

Após o levantamento dos dados, realizou-se um cruzamento das informações apuradas, possibilitando uma análise abrangente do empreendimento e de suas principais categorias de sistemas construtivos em relação ao carbono incorporado, ou seja, o carbono emitido na fase pré-operacional (A1-A5). Em seguida, comparou-se a situação originalmente concebida através do binômio custo x impacto. Essa avaliação foi viabilizada pela monetização dos quantitativos de CO_{2eq}. Por fim, com essas informações, é possível realizar uma série de análises comparando a quantidade de carbono obtida e os componentes do binômio custo x impacto, para alcançar a solução otimizada.

3.1. Parâmetros de projeto e premissas adotadas

Conforme mencionado na seção anterior foi considerado o SINAPI para determinação dos custos físicos de cada sistema construtivo. Para tal, considerou-se a data-base: outubro/23, para o estado de São Paulo. E os coeficientes de emissão CO_{2eq}, que correspondem às fases do A1 até o A3, ou seja, toda a energia dedicada à extração, ao beneficiamento e aos transportes internos relativos à produção já está incorporada dentro dos fatores de emissão utilizados. A equação 1 calcula as emissões estimadas de dióxido de carbono incorporado:

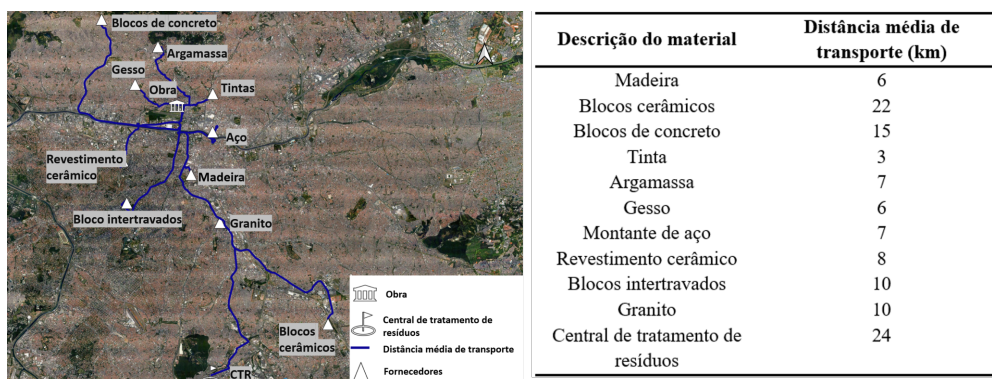
$$ECO_{2ii_n} = q_n \times FE_{CO_2} \quad (1)$$

Onde:

- ECO_{2ii} – emissões estimadas de dióxido de carbono incorporado inicial;
- n – material de construção discriminado;
- q – quantidade utilizada do material de construção (kg);
- FE_{CO₂} – fator de emissão de CO₂ do material (kgCO₂/kg).

A fase A4 de cada sistema construtivo considerado no estudo, correspondente ao transporte do fornecedor do material à obra, foi incluída considerando um coeficiente de transporte adotado por Kozloski [9], 0,0354 kgCO₂-L/t.km, que considera exclusivamente as distâncias, dos fornecedores à obra, sendo trafegado com veículo cheio da fábrica ao local da obra e vazio do local da obra à fábrica, ou seja, com retorno vazio. Considerando os trajetos viáveis mais próximos ao local de obra considerado para cada material, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2
Distância média de transporte dos fornecedores à obra.



A equação 2, proposta pela referida autora, foi alterada. Suprimiram-se as perdas, haja vista que já são consideradas nos quantitativos unitários introduzidos no SINAPI.

$$ECO_{2itr_n} = q_n \times d_n \times CECO_{2T} \quad (2)$$

Onde:

ECO_{2itr} – emissões estimadas de dióxido de carbono incorporado de transporte;

n – material de construção discriminado;

q – quantidade de material de construção utilizado (kg);

d – distância entre o portão da fábrica e estabelecimento/estabelecimento comercial e obra;

CECO_{2T} – coeficiente de emissão de CO₂ pelo transporte

Já a fase A5, que corresponde às emissões geradas na incorporação dos materiais na obra, seja pelo consumo de energia elétrica dos equipamentos necessários, seja pelo consumo de combustíveis, aplicados na sua instalação ou execução, foram contabilizados a partir do SINAPI e aplicados os fatores de emissão de CO_{2eq} disponibilizados no SIDAC, para seus respectivos insumos.

As perdas envolvidas no processo de execução da obra são incluídas nos próprios coeficientes do SINAPI, não sendo necessário serem estimadas à parte. No entanto, a emissão relativa aos transportes dos materiais excedentes (resíduos de construção) até sua destinação final (Centros de Tratamento de Resíduos) foi contabilizada a

partir de uma taxa igual a 150kg/m² de área construída, conforme indicado em Pinto [10] e aplicada na equação 2.

Conforme mencionado anteriormente a forma de equiparar os custos físicos com os impactos de carbono foi através monetização das emissões de CO_{2eq}. Como ainda não há um mercado regulado de carbono no Brasil que determine um preço nacional regulamentado, foi considerado o valor obtido a partir de cotação, realizada em maio de 2023, com empresas de fornecimento de créditos de carbono certificados a partir da execução de projetos de reflorestamento, cujo valor unitário médio corresponde a R\$ 117,92/t CO_{2eq}.

3.2. Cenários

Assim, para destacar o potencial do conjunto de ferramentas desenvolvido, foram estabelecidos cinco cenários distintos, buscando observar extremos nas análises e identificar um ponto ótimo que maximize os aspectos abordados. No entanto, é importante ressaltar que os cenários apresentados são apenas exemplos de aplicação, ou seja, é possível definir análises com enfoques mais personalizados.

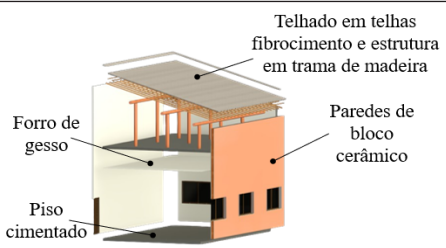
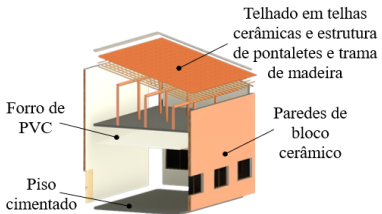
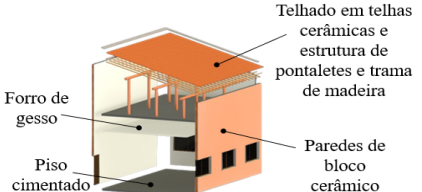
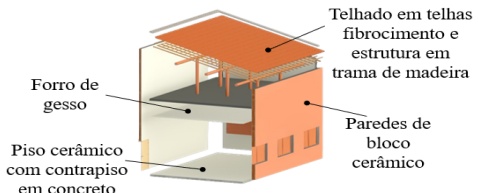
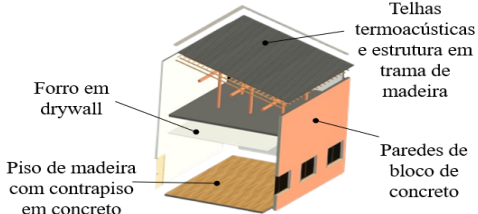
A premissa adotada visa subsidiar a tomada de decisão nas fases de projeto, considerando custos e impacto ambiental. A comparação entre os indicadores de custo físico, custo de carbono incorporado e total de CO_{2eq} apurado na edificação resultante, torna mais evidente o impacto da adoção de cada material no contexto do empreendimento, possibilitando atingir o ponto de equilíbrio entre a eficiência do material em termos do binômio estabelecido e eficiência técnica do elemento, de acordo com sua proposta e uso na edificação.

Na tabela 1, estão descritos os cenários modelados e avaliados na simulação, levando em consideração a envoltória do edifício, com foco nos principais grupos de materiais contribuintes para o carbono incorporado. Todos os cenários foram comparados com o projeto original (*baseline*), que possuía as seguintes características: envoltórias em blocos cerâmicos de 23cm e 15cm de espessura, externas e internas respectivamente; cobertura em telha cerâmica; piso com revestimento cerâmico internamente e acabamento cimentado externamente; forro em gesso; portas e janelas em madeira. De acordo com a localidade do estudo de caso, não foi considerada a utilização de isolantes térmicos na envoltória da edificação.

Diante deste contexto, faz-se necessário definir indicadores abordados na seção 4:

- Intensidade: corresponde à quantidade de tonelada de CO_{2eq} obtida para um determinado cenário por m² de área construída da edificação em avaliação (t CO_{2eq}/m²);
- Custo total: compreende o custo físico, em reais, dos materiais com a adição do custo referente ao carbono incorporado na extração, fabricação, transporte e execução de um dado material ou conjunto de materiais.

Tabela 1: Descrição de cenários propostos.

Cenário	Descrição	Tipo de uso
1	Este cenário enfatiza a minimização dos custos, buscando escolher materiais mais acessíveis financeiramente. Com o intuito de equilibrar a qualidade dos materiais e a economia financeira.	 <p>Telhado em telhas fibrocimento e estrutura em trama de madeira</p> <p>Paredes de bloco cerâmico</p> <p>Forro de gesso</p> <p>Piso cimentado</p>
2	Este cenário foca na redução do impacto ambiental, com a minimização da emissão de CO ₂ ^{2eq} . Buscando identificar e selecionar materiais que tenham menor pegada de carbono, promovendo práticas sustentáveis na construção.	 <p>Telhado em telhas cerâmicas e estrutura de pontaltes e trama de madeira</p> <p>Paredes de bloco cerâmico</p> <p>Forro de PVC</p> <p>Piso cimentado</p>
3	O terceiro cenário buscou um ponto ótimo que equilibre tanto os custos quanto o impacto ambiental. Aqui, a análise procura identificar materiais que, além de serem economicamente viáveis, possuam uma eficiência ambiental considerável.	 <p>Telhado em telhas cerâmicas e estrutura de pontaltes e trama de madeira</p> <p>Paredes de bloco cerâmico</p> <p>Forro de gesso</p> <p>Piso cimentado</p>
4	No quarto cenário, o objetivo é avaliar a construção nos aspectos de custo e impacto ambiental, empregando um sistema construtivo conservador, mais tradicionalmente aceito.	 <p>Telhado em telhas fibrocimento e estrutura em trama de madeira</p> <p>Paredes de bloco cerâmico</p> <p>Forro de gesso</p> <p>Piso cerâmico com contrapiso em concreto</p>
5	Este cenário, procura avaliar a construção nos aspectos de custo e impacto ambiental, utilizando um sistema construtivo com materiais e métodos inovadores, pensando numa construção mais enxuta e limpa.	 <p>Telhas termoacústicas e estrutura em trama de madeira</p> <p>Paredes de bloco de concreto</p> <p>Forro em drywall</p> <p>Piso de madeira com contrapiso em concreto</p>

4. Resultados e discussões

O presente artigo visa explorar e analisar criticamente os desdobramentos obtidos nos cinco cenários propostos, delineando abordagens distintas que visam mensurar o impacto de cada um deles, através das alternativas de seleção dos materiais de construção civil. Cada cenário foi elaborado para abordar possibilidades específicas de análise ao usuário, permitindo uma compreensão aprofundada dos trade-offs entre custos financeiros e impactos ambientais associados a diferentes escolhas de materiais.

Na Figura 3, é possível observar os custos finais de cada um dos cenários compostos pelos custos físicos, referentes à execução, e os custos convertidos a partir da quantificação de CO₂. Observamos uma variação máxima de 49,03% entre todos os cenários estudados, referente aos custos totais, o que pode representar um incremento significativo no valor global do empreendimento. Como relatado anteriormente, o cenário 1 demonstra o menor custo total, R\$ 485.211,31, o que representa 40,67% do custo do projeto originalmente modelado, aqui representado como *baseline*.

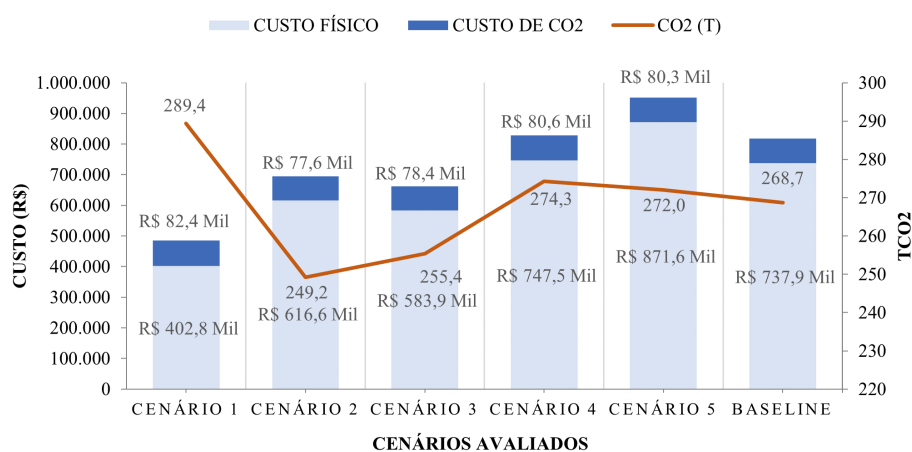


Figura 3
Composição dos custos e emissões por cenário.

Entretanto, ao analisar as emissões, é possível observar que o mesmo cenário 1 apresenta, em contrapartida, o maior quantitativo de CO_{2eq}. Enquanto que o cenário 2 que apresenta o menor valor de emissão, cerca de 40,26t menos de CO_{2eq} em comparação ao cenário 1, traz ainda uma redução de custo total de cerca de 17,80% em relação ao *baseline*.

Enquanto o cenário 3, o qual buscava uma otimização desses parâmetros, apresenta apenas 2,52% de aumento no quantitativo de CO_{2eq}, em relação ao cenário 2. E tendo ainda uma redução de 4,83% de custo total em relação ao cenário 2 e cerca de 19,03% em relação ao *baseline*. Entre os cenários 2 e 3, foram alterados os forros e as portas, pois identificou-se que havia elementos que possuíam quantitativos de emissão de CO_{2eq} equiparáveis com um custo físico relativamente menor e desta forma, pode-se obter essa pequena redução de custo total, otimizando as soluções.

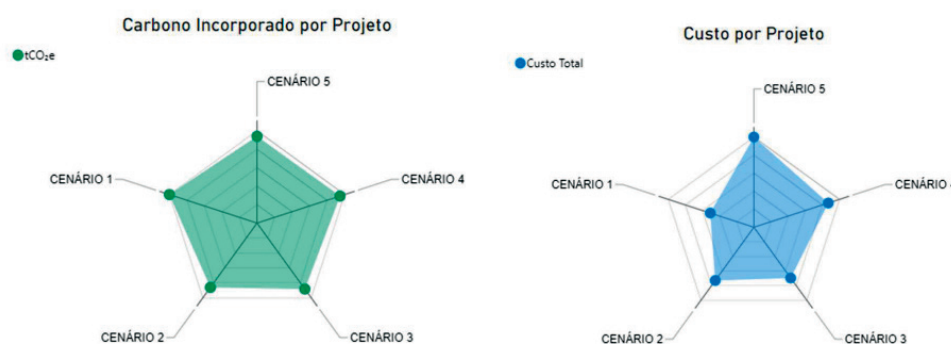
Ao compararmos os cenários 4 e 5 que confrontam a utilização de materiais mais tradicionais e mais “inovadores” respectivamente, é possível observar um significativo aumento no custo de implantação para o cenário 5, sendo 16,31% mais oneroso se comparado ao *baseline*, além disso, constata-se um aumento de impacto em torno de 9,17% em relação ao cenário 2. Enquanto que o cenário 4, apesar de um custo total próximo aos dos cenários 2 e 3, ele possui uma emissão de CO_{2eq} 10,07% maior que o cenário 2.

O parâmetro intensidade de CO_{2eq} é linearmente proporcional ao quantitativo de emissão e tem as mesmas configurações e tendências de aumento e redução conforme

observado na Figura 3. Entretanto, é uma boa referência para um benchmarking com outras edificações, outros projetos e estudos. No presente trabalho as Intensidades de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ variaram de $0,13 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$ no cenário 1 a $0,08 \text{ t CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$, no cenário 2, tomando-se em consideração os cenários máximos e mínimos. Salientando-se que apenas as soluções construtivas relacionadas à disciplina de arquitetura são contempladas nestes resultados, restritas às fases de ciclo de vida, A1 a A5.

A Figura 4 ilustra o comparativo entre os cenários estudados trazendo uma ótica do total das emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e dos custos totais. Onde é possível observar que as variações de quantitativo de emissões são equiparáveis entre si e em contrapartida, os custos totais apresentam variabilidades mais acentuadas, ratificando as discussões levantadas anteriormente.

Figura 4
Comparação entre diagramas de teia das emissões dos custos por cenário.



5. Conclusão

Através da análise detalhada desses cenários é possível obter insights valiosos para o projetista, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões, independente de que viés de análise seja tomado. Ao analisarmos apenas a vertente de custos constatamos a possibilidade de redução de custos de até 49%, já com um viés inclinado apenas à questão ambiental, observou-se a possibilidade de redução de até 9,17% em emissão de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, dentre os cenários analisados e 7,28% em relação ao *baseline*.

Vale salientar que todas as soluções construtivas apresentadas no presente trabalho, cumprem tecnicamente a funcionalidade a que se propõem. Entretanto, obviamente, os aspectos estéticos e arquitetônicos precisam ser analisados e, a partir da ferramenta apresentada, observamos a possibilidade de mensurar o impacto de cada solução construtiva dentro do processo, garantindo uma tomada de decisão mais consciente no desenvolvimento da elaboração dos projetos.

Referências

- [1] H.F. Graf, M.H.C. Marcos, S.F. Tavares, S. Scheer, “Estudo de viabilidade do uso de BIM para mensurar impactos ambientais de edificações por energia incorporada e CO_2 incorporado” em XIV ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Juiz de Fora, 29 a 31 Outubro, 2012

- [2] E. Dezen-Kempton, et al. "O uso de BIM na avaliação da energia incorporada e emissões de CO₂ de materiais reciclados e convencionais" em *ENTAC 2018 XVII – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Foz do Iguaçu, 2018.
- [3] C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston, *Manual de BIM – Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores*. 1ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- [4] BRE. BRE Global Methodology for the Environmental Assessment of Buildings using EN 15.978:2011. PN 326 Rev 0.0. BRE Global Ltd: Londres, 2018.
- [5] CEN/TC 350 – SUSTAINABILITY OF CONSTRUCTION WORKS (Europe). 08/11/2011. EN 15978:2011: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method, [S. l.], 2011.
- [6] CEN/TC 350 – SUSTAINABILITY OF CONSTRUCTION WORKS (Europe). 29/10/2019. EN 15804:2012+A2:2019: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products, [S. l.], 2019.
- [7] S.F. Tavares, "Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras". Tese de Doutorado, Florianópolis, UFSC, 2006.
- [8] L. S. Oliveira, "Avaliação do ciclo de vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: alvenaria e pavimentação," Dissertação de Mestrado, São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2015.
- [9] C.L. Kozloski, "Emissão de CO₂ de materiais de construção civil no Brasil: Estimativas na etapa projetual de edificações" Dissertação de Mestrado, Santa Maria, UFSM, 2020.
- [10] T.P. Pinto, "Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana," Tese de Doutorado, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 1999.