

Avaliação da Energia Incorporada, Carbono Incorporado e Pegada Hídrica associadas à etapa de produção dos materiais utilizados no projeto da sede do CERES

Assessment of Embodied Energy, Embodied Carbon and Water Footprint related to the production phase of the materials used in the CERES project

Anelise Anapolski, Doutoranda, UFRGS

anelise.anapolski@gmail.com

Janaine F. Gaelzer Timm, Doutoranda, UFRGS

janainetimm@hotmail.com

Ingrid Zitto, Mestranda, UFRGS

ingridzitto@hotmail.com

Miguel Aloysio Sattler, PhD, UFRGS

msattler@gmail.com

Resumo

O desenvolvimento sustentável requer escolhas mais coerentes com a capacidade regenerativa do planeta e para isso é fundamental investigar os impactos ambientais dos processos e dos materiais durante seu ciclo de vida. A construção civil é responsável por parcela significativa desses impactos. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo calcular a energia incorporada, carbono incorporado e pegada hídrica ligados à etapa de produção dos materiais relacionados aos sistemas construtivos de Vedação Vertical Externa e de Cobertura do projeto do Centro de Estudos Regenerativos (CERES). O trabalho foi desenvolvido em três etapas: (i) descrição dos sistemas construtivos com levantamento quantitativo; (ii) revisão de literatura identificando parâmetros de análise para os impactos ambientais; (iii) cálculo dos impactos ambientais potenciais e análise. Os resultados encontrados são fundamentais para apoiar decisões mais coerentes com o contexto e com a demanda e têm o potencial de embasar ações que promovam o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Avaliação ambiental; Construção civil; Energia incorporada; Carbono incorporado; Pegada hídrica.

Abstract

Sustainable development requires consistent choices with the planet's regenerative capacity and for that, it is essential to investigate the environmental impacts of processes and materials during their life cycle. Civil construction is responsible for a significant portion of these impacts. Thus, the present work aims to calculate the embodied energy, embodied carbon and water footprint linked to the production stage of materials related to the construction systems of External Walls and Roof of the project of the Center of Regenerative Studies (CERES). The work was developed in three stages: (i) description of the construction systems with quantitative survey; (ii) literature review identifying analysis parameters for environmental impacts; (iii) calculation of potential environmental impacts and analysis. The results found are fundamental to support more consistent decisions with the context and demand and have the potential to support actions that promote sustainable development.

Keywords: *Environmental assessment; Construction; Embodied energy; Embodied carbon; Water Footprint.*

1. Introdução

Todas as atividades humanas provocam impactos ambientais, porém a construção civil situa-se entre as maiores consumidoras de recursos naturais. As edificações possuem larga duração e, conseqüentemente, seus impactos não se limitam apenas à etapa de construção; iniciam-se na extração e produção da matéria-prima e estendem-se pelo transporte até o canteiro de obras, à produção do edifício, sua operação, manutenção e sua disposição final (EUROPEAN STANDARDS 15978, 2011).

Para avaliar e melhorar o desempenho do edifício, o método da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente aceito e está no centro dos padrões atuais para a avaliação da sustentabilidade da construção (RÖCK et al., 2018). Indicadores ambientais como Energia Incorporada, Pegada de Carbono e Pegada Hídrica ajudam a quantificar e classificar o consumo de recursos naturais através da ACV de produtos e serviços desde a etapa de produção, passando pelo consumo até o descarte.

Este trabalho contribui para o conhecimento acerca dos impactos ambientais ligados à etapa de produção dos materiais utilizados na construção civil, por meio do estudo de caso do projeto do Centro de Estudos Regenerativos (CERES). Portanto, trata-se de um recorte parcial de uma ACV. O objetivo é avaliar os impactos ambientais de um projeto com princípios sustentáveis, a fim de levantar informações que possam embasar tomadas de decisão e orientar projetos futuros e escolhas menos impactantes.

2. Metodologia

O trabalho parte do projeto da sede do CERES. São quantificados e avaliados os subsistemas que compõem o Sistema de Vedação Vertical Externo (SVVE) - as alvenarias externas e as esquadrias - e o Sistema de Cobertura. Tais sistemas foram selecionados devido à relevância da envoltória para o desempenho ambiental da edificação e a sua influência no consumo energético, já reconhecida por sistemas de rotulagem de edificações

como o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e o *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology* (BREEAM).

Buscou-se descrever os subsistemas a serem estudados e fazer o levantamento quantitativo dos materiais necessários. A seguir foi realizada revisão da literatura, a fim de obter parâmetros individuais de análise dos materiais, que permitissem a determinação da Energia Incorporada, do Carbono Incorporado e da Pegada Hídrica, ligadas à fase de produção dos mesmos.

2.1 Objeto de estudo

O projeto da sede do CERES em Feliz, RS, desenvolvido por alunos de pós-graduação, na disciplina de Projetos Regenerativos, sob orientação do Prof. Miguel Aloysio Sattler (LAMENHA et al, 2019), foi selecionado como objeto de análise, com a intenção de avaliar quantitativamente os impactos ambientais de um projeto com princípios sustentáveis. A proposta possui área total de 58,55m², distribuídos em dois pavimentos (Figura 1).



Figura 1 - Perspectivas ilustrativas do projeto do CERES em Feliz-RS. Fonte: Adaptado de LAMENHA et al., 2019.

O projeto apresenta um SVVE composto por diversas tipologias de alvenarias e de esquadrias. No pavimento térreo será mantida parte da estrutura de uma antiga residência existente no terreno. O projeto prevê a incorporação de trechos existentes de parede de blocos cerâmicos maciços, assentados sobre fundação de pedra. Foi contabilizada a reconstrução do emboço, com massa única, e pintura à base de cal. Para as alvenarias a construir, serão utilizados tijolos de demolição, disponíveis localmente. As travessas de madeira de eucalipto, nas paredes em enxaimel, serão provenientes de árvores existentes no local.

No que tange à materialidade das paredes do SVVE, foram definidos cinco tipos: (i) alvenaria de tijolos maciços à vista, com detalhes em Enxaimel (a construir); (ii) alvenaria de tijolos maciços rebocada (a construir); (iii) alvenaria de tijolos maciços (existente); (iv) alvenaria de pedra basalto local (a construir); (v) paredes de toras de eucalipto (a construir).

As esquadrias são compostas por madeira de eucalipto e vidro transparente, com espessura de 3,00 mm, incolor e textura lisa. As folhas das esquadrias são subdivididas em pinázios e há oito tipologias de aberturas.

Foram consideradas duas tipologias de cobertura: telha cerâmica, do tipo francesa, e cobertura verde. A cobertura cerâmica, contempla uma área total de 9,32m² e foi escolhida

como forma de minimizar o impacto ambiental que poderia ocorrer com a utilização de lajes de concreto. As telhas francesas e as chapas de alumínio *off-set* são oriundas de reutilização, reduzindo a carga ambiental aplicada. É composta, ainda, por estrutura e forro em madeira de cedrinho.

A cobertura verde possui uma área de 29,01 m² e é composta por: laje; impermeabilização monocomponente de base acrílica; lâmina de água sobre a camada drenante; camada de brita n° 3, de 8 cm; manta permeável (Bidim); camada de brita n° 2, de 5 cm; camada de agregado miúdo, com areia média de 3 cm; camada de 10 cm, de terra orgânica/vegetal; e a vegetação. São previstos rufos, algerosas e calhas de aço galvanizado. Considera-se que a terra e a vegetação serão reaproveitadas do próprio terreno.

3. Resultados e discussões

As categorias de análise foram agrupadas de acordo com as características construtivas e os acabamentos comuns. Foram quantificados os materiais e identificados os impactos parciais envolvidos na etapa de fabricação, quanto à energia incorporada, carbono incorporado e pegada hídrica. Os resultados do impacto ambiental relacionado à energia incorporada das alvenarias e esquadrias estão expressos nas Tabelas 1 e 2.

3.1 Energia incorporada

Os edifícios consomem energia, direta ou indiretamente, em todas as fases do seu ciclo de vida, desde o berço, até o túmulo, e há interação entre as fases de uso de energia: energia incorporada e operacional (CABEZA et al., 2014). Energia incorporada é a energia utilizada na fase pré-operacional do edifício, com atividades que envolvem, desde a extração e processamento dos materiais utilizados, até a finalização da execução da edificação, enquanto a energia operacional é a energia consumida na fase de uso da edificação. Os dados de energia incorporada foram baseados no trabalho de Kuhn (2006).

Os resultados apontam que a tipologia de SVVE de alvenaria responsável pelo maior impacto energético é a de toras roliças de eucalipto (tipologia V, com 34,17% do total). Esse resultado é explicado, principalmente, pela energia incorporada do basalto ser considerada desprezível, e as alvenarias de tijolos utilizarem tijolos reaproveitados, diminuindo a energia incorporada destas tipologias. Observa-se que o material com o maior impacto nessa categoria é a cal hidratada, utilizada na argamassa e para acabamento.

Os resultados das esquadrias indicam que o vidro apresenta mais energia incorporada que a madeira de eucalipto. Tal resultado é desproporcional à massa dos materiais utilizados, visto que a quantidade de madeira é aproximadamente três vezes maior que a de vidro. Os dados refletem as diferenças no índice energético dos materiais.

Para a cobertura cerâmica, o maior impacto é causado pelas calhas em aço galvanizado (44%), seguido pela madeira de cedrinho (41%). Observa-se que a madeira de cedrinho representa 82% da massa total dos materiais não reutilizados, enquanto o aço galvanizado representa apenas 1,35% deste total. Evidencia-se o alto índice energético relativo à produção do aço, frequentemente apontado como um dos materiais mais impactantes da indústria da construção civil. Quanto à cobertura verde, observa-se que os maiores impactos energéticos correspondem à impermeabilização, seguida pela manta permeável,

representando 44% e 27% do conteúdo energético total, respectivamente. Sabe-se que esses itens podem apresentar potencial de impacto elevado devido ao grau de industrialização envolvido na sua produção.

3.2 Carbono incorporado

O carbono incorporado pode ser definido como a soma das emissões de carbono relacionadas ao consumo de combustíveis no processo de produção ou daquelas que podem surgir, por exemplo, de reações químicas (JONES e HAMMOND, 2019).

Dentre os materiais da construção civil, destacam-se os impactos de carbono incorporado provenientes da fabricação de cimento. De acordo com Marland (2003), a fabricação de cimento é responsável por 4 a 5% de todo o CO₂ lançado na atmosfera por atividades humanas. Os dados de carbono incorporado aos materiais foram extraídos da base de dados desenvolvida por Hammond e Jones, nomeada de ICE (*Inventory of Carbon and Energy*) (JONES e HAMMOND, 2019), versão V. 3.6 Beta, de 2019.

A maioria dos materiais da construção civil apresenta impactos significativos associados ao carbono incorporado, todavia há materiais que podem diminuir o impacto total da edificação nesse quesito, como os materiais reaproveitados e aqueles que em seu processo de crescimento ou produção capturam carbono. É o caso da madeira que captura CO₂ em seu processo de crescimento; logo, os impactos de carbono incorporado são negativos.

Analisando os resultados, verifica-se que a Tipologia V, dentre as alvenarias, seria a melhor opção segundo esse critério, devido ao carbono capturado durante a fase de crescimento do eucalipto. As outras tipologias que apresentam baixo impacto neste quesito são as que usam detalhes similares ao Enxaimel (I e III), pois empregam madeira de *Pinus* e tijolos reaproveitados. A opção mais impactante seria a da Tipologia IV, de basalto local, em função do combustível consumido pelo equipamento para sua extração e no transporte até o local de processamento. Além disso, o dado internacional utilizado não reflete a redução do impacto de carbono incorporado, pelo uso de pedra encontrada na região: o basalto. A escolha de materiais existentes no local tem o potencial de diminuir os impactos atrelados ao transporte.

Observa-se que as tipologias I, II e III não acumularam o impacto de todos materiais que as compõem, pois alguns foram reaproveitados das preexistências no local de implantação. Enquanto diversos estudos apontam os produtos compostos por cimento como os mais impactantes na categoria de carbono incorporado, tal material não se destacou, em função das pequenas quantidades empregadas. Verificou-se que a cal hidratada foi o material que mais se sobressaiu quanto ao impacto de carbono incorporado.

Como este estudo não considera as fases finais do ciclo de vida, de extração e produção dos materiais da construção civil, observa-se que, se a etapa do final de vida fosse considerada, os valores de captura de CO₂ pelas madeiras utilizadas seriam contabilizados na fase de crescimento da planta e posteriormente descontados na fase de final de vida dos elementos de madeira, no processo natural de decomposição. Considerando a vida útil prevista para a edificação, o carbono absorvido pela madeira permanece capturado por um longo período, o que indica que seu uso na construção civil poderia ser uma alternativa eficaz para reduzir os índices de CO₂ na atmosfera.

Para a cobertura em cerâmica, observa-se que o alumínio e o aço galvanizado apresentam os maiores índices de emissões de CO₂. Como, no caso, o alumínio é proveniente de reuso, esse índice não é contabilizado para a carga ambiental. Observa-se que na cobertura em cerâmica, o índice mais representativo é o do aço, seguido pela manta permeável. Não foi possível verificar o impacto da impermeabilização, quanto a este critério, uma vez que não foi encontrada fonte de dados para o material.

A areia apresenta o maior valor de carbono incorporado para a cobertura verde: cerca de 36%, enquanto sua massa representa apenas 11% da massa total do subsistema. Ela é seguida pela brita que, considerando-se os tipos n° 2 e 3 juntos, representa 31% das emissões de CO₂ e 88% da massa total. Por fim, o aço expressa 25% do carbono incorporado e conta com massa de apenas 0,17% em relação a massa total da cobertura desse tipo. Esse resultado destaca a carga ambiental do aço na indústria da construção civil.

3.3 Pegada Hídrica

A pegada hídrica mede, tanto o consumo, quanto a poluição da água, sendo um indicador adequado do modo como consumidores e produtores interagem com os recursos hídricos. Ela é definida como a soma das pegadas hídricas de todos os processos envolvidos direta ou indiretamente na fabricação de um produto (HOEKSTRA et al, 2011, p. 3). No Brasil, a NBR ISO 14.046:2014 determina princípios, requisitos e diretrizes relacionados com a avaliação da pegada hídrica de produtos, processos e organizações, com base na metodologia de ACV (ABNT, 2014). Para o cálculo da pegada hídrica do projeto do CERES, utilizou-se a base de dados Ecoinvent v. 3.6, desenvolvida pelo *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*.

Dentre os materiais especificados, os que apresentam maior impacto hídrico são as madeiras, seguidas da areia. Na Tabela 1, observa-se os valores de pegada hídrica, por tipologia de alvenaria, permitindo compará-las. Observa-se que as alvenarias do tipo I são aquelas que implicaram no maior impacto hídrico, sendo responsáveis por 37,2% da pegada hídrica total das alvenarias. O material que mais contribui para este resultado é a madeira de *Pinus*, utilizada nas tipologias I e III. A tipologia I possui maior área do que a tipologia III, assim impactando mais nos quantitativos de materiais consumidos. Além disso, as alvenarias do tipo I são constituídas por paredes já existentes no local, enquanto as do tipo III serão construídas, demandando maior quantidade de materiais. A pegada hídrica da tipologia V também merece destaque, representando 27,1% da pegada hídrica total das alvenarias. Esse resultado pode ser explicado pelo consumo hídrico da madeira de eucalipto durante seu crescimento.

Analisando os materiais que compõem as esquadrias, a madeira apresenta impacto de pegada hídrica mais pronunciado que o vidro. No Sistema de Cobertura (SC), o material mais crítico quanto à pegada hídrica, mais uma vez, é o aço galvanizado, seguido pela madeira de *Pinus*. Enquanto o aço resulta em uma pegada hídrica de, aproximadamente, 62% da total e massa correspondente a 1,35% da massa total, a madeira possui uma pegada hídrica de 37%, em relação ao total e massa de 16% em relação a massa total. As telhas cerâmicas e as chapas de alumínio não foram contabilizadas nos resultados, pois são materiais reutilizados, pré-existent no local.

A pegada hídrica unitária mais significativa do SC verde é a do aço galvanizado, no entanto, devido a sua massa, a brita, apresenta a maior pegada hídrica por item. As britas nº 2 e 3 são consideradas como um único material, representando cerca de 76% da pegada total, enquanto sua massa representa 88% da massa total da cobertura. Por outro lado, a massa de aço corresponde a 1,70% da massa total da estrutura, e corresponde a uma pegada hídrica de 16,50%, da pegada total.

3.4.3 Comparativo entre os sistemas construtivos

Os resultados dos impactos ambientais dos três diferentes sistemas são apresentados na Tabela 1, bem como o total geral da envoltória.

Tabela 1 - Comparativo dos impactos ambientais de energia incorporada, carbono incorporado e pegada hídrica, dos sistemas construtivos analisados (SVVE e SC) no projeto arquitetônico.

COMPARATIVO ENTRE OS SISTEMAS CONSTRUTIVOS			
Sistema construtivo	Energia incorporada (MJ)	Carbono incorporado (kg CO ₂)	Pegada Hídrica (l)
Sistema de Vedação Vertical Externa (SVVE) - Alvenarias	6.473,23	-3.352,01	304,20
Sistema de Vedação Vertical Externa (SVVE) – Esquadrias	6.460,40	-444,25	7,93
Sistema de Cobertura (SC)	7.164,03	-903,68	391,31
TOTAL GERAL ENVOLTÓRIA	20.097,66	-4.699,94	703,44

Quanto à energia incorporada, os três sistemas apresentam valores muito próximos de impacto total da envoltória, SVVE - Alvenarias (32,21%), SVVE - Esquadrias (32,15%) e SC (35,65%). Entretanto, considerando a massa de cada sistema – SVVE – Alvenarias, com 49.405,32 kg; SVVE – Esquadrias, com 947,61 kg; e SC – Sistema de Cobertura, com 21.556,97 kg - verifica-se que as esquadrias se destacam negativamente, pois, mesmo apresentando menor massa, apresentam os maiores impactos ambientais.

Na análise do carbono incorporado, observa-se que o SVVE – Alvenarias é responsável por 71,32% dos impactos; enquanto o SC – Sistema de Cobertura é responsável por 19,22% e o SVVE – Esquadrias, por 9,45%, porém todos os impactos são positivos. Os valores totais finais foram negativos em função da captura de carbono pela madeira empregada na fabricação das peças, em sua fase de crescimento.

Quanto aos resultados da pegada hídrica, destaca-se o baixo impacto do SVVE - Esquadrias, que representa apenas 1,13% do impacto total nesta categoria. Os resultados percentuais do SVVE - Alvenarias e do SC – Sistema de Cobertura são muito similares, sendo a primeira responsável por 43,24% e a segunda por 55,63% dos impactos correspondentes à pegada hídrica. Para cada categoria de impacto há sistemas construtivos que se destacam. Isto reforça a ideia de que a escolha das categorias de impacto a serem analisadas é de suma importância e deve estar alinhada com o objetivo da análise e com as demandas locais de cada contexto.

A literatura sobre Pegada Hídrica é relativamente restrita, indicando uma lacuna científica, principalmente no Brasil, refletindo uma realidade ainda pouco conhecida localmente. Em relação à energia incorporada e pegada de carbono também não existem dados identificando os impactos associados aos diferentes sistemas construtivos.

Na Tabela 2 abaixo apresentam-se os resultados obtidos para os sistemas de vedação vertical externa e de cobertura, de forma discriminada, por tipologias e materiais.

Tabela 2 - Energia incorporada, Carbono incorporado e Pegada Hídrica do SVVE e SC.

Tipologia	Subsistema	Materiais	Energia incorporada		Carbono incorporado		Pegada hídrica								
			Índice Energético (MJ/kg) ¹	Conteúdo energético (MJ)	CO ₂ incorporado (tCO ₂ /kg)	Consumo Total CO ₂ (kg)	PH Azul (l/kg)	PH Verde (l/kg)	PH Cinza (l/kg)	PH Total (l) ⁶	Total				
SVVE - (i) Alvenaria de tijolos maciços à vista com detalhes em Enxaimel (A CONSTRUIR)	Parede tijolos de demolição (10cm)	Tijolo cerâmico	2,21	0,0 ²	1,989,98	0,21	0,0 ³	-127,34	2,72E-02	0	0	2,72E-02	0,0 ³	113,17	
		Cimento Portland CPV 32	1,88	240,84		0,912	116,83	0,0001574	0,003970	0,000187	0,00573	7,34E-01			
		Cal hidratada	2,35	1,267,60		0,78	420,73	0	0	0	0	0	0	0	
	Enxaimel (A CONSTRUIR)	Areia média	0,07	154,09		0,00438	9,64	2,00E-04	8,00E-03	8,15E-03	1,64E-02	3,60E+01			
		Madeira Pinus	0,50	327,45		-1,03	-674,55 ⁴	68,80 ⁵	0 ²	6,87E-02 ³	68,87 ²	7,64E+01			
		Parede de tijolos demolição (15cm)	2,21	0,0 ²	732,55	0,21	0,0 ³	241,22	2,72E-02	0	0	2,72E-02	0,0 ³	13,39	
	de tijolos maciços rebocados (A CONSTRUIR)	Cimento Portland CPV 32	1,88	100,61		0,912	48,81	1,57E-03	3,97E-03	1,87E-04	5,73E-03	3,07E-01			
		Cal hidratada	2,35	529,52		0,78	175,76	0	0	0	0	0	0	0	
		Areia média	0,07	64,37		0,00438	4,03	2,00E-04	8,00E-03	8,15E-03	1,64E-02	1,50E+01			
	Pintura caiçação (cal)		2,35	38,05		0,78	12,63	3,00E-03	0	0	3,00E-03	4,86E-02			
Tijolo cerâmico maciço		2,21	0,0 ²	1,287,08	0,21	0,0 ³	-154,15	2,72E-02	0	0	2,72E-02	0,0 ³	78,36		
Cimento Portland CPV 32		1,88	143,51		0,912	69,62	1,57E-03	3,97E-03	1,87E-04	5,73E-03	4,37E-01				
de tijolos maciços rebocados com detalhes (emboço 2,5cm) (EXISTENTE)	Cal hidratada	2,35	753,31		0,78	250,70	0	0	0	0	0	0	0		
	Areia média	0,07	91,81		0,00438	5,74	2,00E-04	8,00E-03	8,15E-03	1,64E-02	2,14E+01				
	Madeira Pinus	0,50	34,55		-1,03	-498,31 ⁴	68,80 ⁵	0 ²	0,07 ³	68,87 ²	5,65E+01				
SVVE - (iv) Alvenaria de Pedra (basalto local) (assentamento)	Basalto local	-	0,0 ²	251,38	0,079	1,148,99	1,245,46	8,40E-06	0	8,40E-06	1,68E-05	2,44E-01	14,91		
	Cimento Portland CPV 32	1,88	191,09		0,912		1,57E-03	3,97E-03	1,87E-04	5,73E-03	5,83E-01				
	Areia média	0,07	60,29		0,00438		2,00E-04	8,00E-03	8,15E-03	1,64E-02	1,41E+01				
SVVE - (v) Paredes de tora de madeira roliça 15cm toras eucalipto roliças	Madeira de eucalipto	Vidro transparente (esp.: 3,00mm / cor: incolor / textura: lisa)	0,5	2,212,24	2,212,24	-1,03	-4,557,21 ⁴	-4,557,21	1,86E-02	0	1,86E-05	1,86E-02	82,38	82,38	
		Telhos de cerâmica francesas - reuso	9,73	0,0 ²	1,147,11	0,480	0,0 ³	-1,1	-15,3 ⁴	1,184,82	1,17E-01	0,0	6,47E-04	6,68E-01	0,0
		Ripas de madeira pinus	0,50	6,96		-1,1	-66,58	6,67E-01	0,0	1,17E-04	1,17E-01	1,62E+00		58,57	
		Chapas off-set 0,5mm	0,0	0,0 ²		7,47	0,0 ³	5,56E-02	0,0	5,56E-01	5,56E+02	0,0	0,0	0,0	
		Guias de pinus (cabros)	0,50	85,55		-1,1	-188,2 ⁴	1,17E-01	0,0	1,17E-04	1,17E-01	2,00E+01			
		Forno de cedrinho e=1mm	0,50	30,27		-1,1	-231,17 ⁴	0,0	0,0	4,03E-04	4,03E-04	2,43E-02			
		Vigas longitudinais de cedrinho	0,50	105,08		-1,1	-736,54 ⁴	0,0	0,0	4,03E-04	4,03E-04	8,46E-02			
		Espelho de cedro duplo	0,50	334,79		-1,1	-736,54 ⁴	0,0	0,0	4,03E-04	4,03E-04	2,70E-01			
		Rufos/ algerosa de aço galvanizado	32,46	0,0 ²		3,03	0,0 ³	2,36E+00	0,0	2,36E-03	2,36E+00	3,66E+01			
		Calhas - aço galvanizado	32,46	502,48		0,78	6,07	3,00E-03	0,0	0,0	3,00E-03	2,33E-02			
SC - Cobertura verde	Vegetação/ grama	Cola branca	65,00	63,70		*2	*2								
		Terra orgânica e=10cm	0,0	0,0 ²	6,016,92	4,0E+03	0,0 ³	281,14	3,42E-04	1,73E-04	0,0	5,15E-04	0,0	332,74	
		Areia média e=3cm	0,07	111,92		2,4E+02	0,0 ³		2,00E-04	8,00E-03	8,15E-03	1,64E-02	2,61E+01		
		Brita n°2 e=5cm	0,07	330,26		7,0E+03	33,03		0,0	2,05E-02	2,05E-05	2,05E-02	9,68E+01		
		Manta permeável (Bídn)	65,0	1,621,10		0,97	24,19		0,0	2,05E-02	2,05E-05	2,05E-02	1,55E+02		
		Brita n°3 e=8cm	0,07	528,42		7,0E+03	52,84		0,0	2,05E-02	2,05E-05	2,05E-02	1,55E+02		
		Impermeabilização monocampanete	65,0	2,671,30		*2	*2								
		Rufos/ algerosa de aço galvanizado	32,46	251,24		3,03	23,45		2,36E+00	0,0	2,36E-03	2,36E+00	1,83E+01		
		Calhas - aço galvanizado	32,46	502,48		0,78	6,07		2,36E+00	0,0	2,36E-03	2,36E+00	3,66E+01		

¹ Valores baseados nas estimativas e cálculos empregados por Kuhn (2006).
² Não calculado por falta de dados.
³ Valor do impacto não calculado por considerar material reutilizado ou reaproveitado.
⁴ Índice negativo referente a captura de carbono que ocorre na fase de crescimento da árvore.
⁵ Unidade: l/m³
⁶ Valores baseados no Ecoinvent 3.6 Database, 2019.

Quanto ao SVVE - Alvenarias, observa-se, na Tabela 2, que a tipologia I destaca-se em relação aos impactos de energia incorporada e pegada hídrica, refletindo seus altos custos ambientais em relação às demais. As tipologias II e III apresentam resultados relativamente menores em relação aos dois parâmetros. Quanto ao carbono incorporado, as três tipologias apresentam resultados pouco expressivos.

A tipologia IV apresenta um resultado mais expressivo em relação à energia incorporada e carbono incorporado (devido ao combustível consumido nos processos de extração e transporte do basalto), do que em relação à pegada hídrica. Entretanto, os três parâmetros analisados apresentam resultados mais semelhantes entre si.

A tipologia V é a que apresenta os resultados mais divergentes, quando os diferentes parâmetros de impacto são analisados. Por um lado, apresenta resultados relativamente maiores quanto à energia incorporada e pegada hídrica. Entretanto, tem uma expressiva taxa de sequestro de carbono, devido à utilização de madeira eucalipto, o que favorece essa tipologia, quanto aos seus custos ambientais. Estes achados reforçam a importância da análise conjunta dos indicadores na ACV dos materiais de construção civil, a fim de oferecer uma visão holística e resultados úteis do ponto de vista ambiental.

Observa-se que as tipologias de alvenarias e coberturas podem apresentar resultados divergentes quando os diferentes parâmetros são analisados (Figuras 2 e 3). Entretanto, como cada tipologia tem representatividade diferente, em relação ao total da área, isso impacta nos resultados comparativos obtidos. Por isso, estes valores foram corrigidos, a fim de obter parâmetros para uma métrica comum, que reflita melhor os custos ambientais de cada tipologia, independentemente de sua área, em relação às demais e ao conjunto (Figuras 2 e 3). Assim, as tipologias foram comparadas tendo seus impactos ambientais multiplicados pela porcentagem que representam no total de alvenarias no SVVE, de modo a realizar uma análise sem essa distorção.

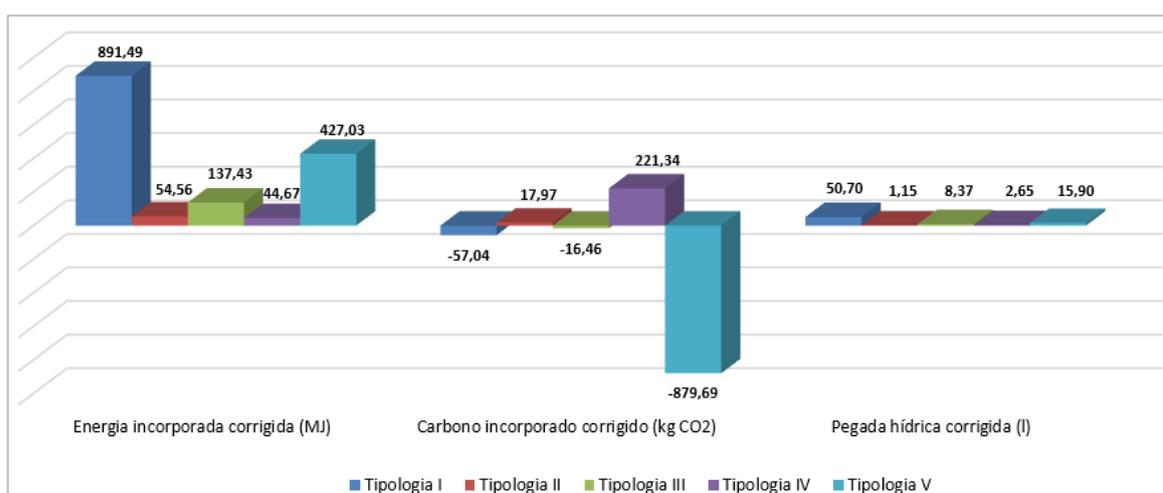


Figura 2 - Gráfico da Energia incorporada corrigida, Carbono incorporado corrigido e Pegada hídrica corrigida, para as diferentes tipologias de alvenarias. Fonte: Autoras, 2019.

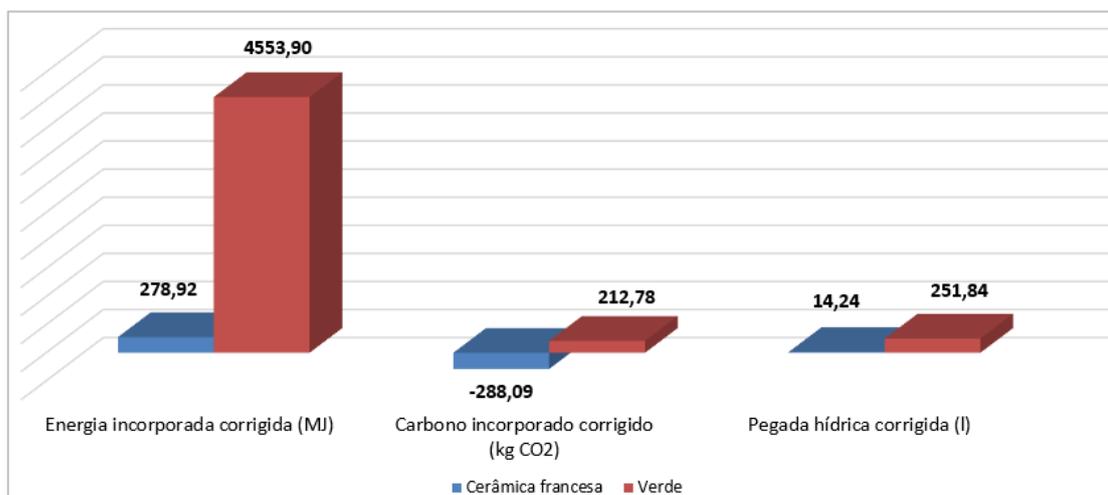


Figura 3 - Gráfico da Energia incorporada corrigida, Carbono incorporado corrigido e Pegada hídrica corrigida para as diferentes tipologias de cobertura. Fonte: Autoras, 2019.

No que tange às esquadrias, verifica-se que as tipologias, são constituídas pelos mesmos materiais, em diferentes proporções. Dessa forma, não cabe uma análise comparativa entre as mesmas, visto que as diferenças no desempenho ambiental refletem as variações de área e volume e da proporção entre madeira e vidro, para cada tipo de esquadria.

4. Considerações finais

A indústria da construção civil cresce constantemente para suprir a carência de moradias e de infraestrutura urbana de uma população mundial em expansão. Todas as novas edificações, estradas e outros elementos construídos demandam recursos naturais, tanto matérias-primas, quanto energia, em proporções superiores à capacidade regenerativa do planeta.

Toda essa demanda deve ser gerenciada de modo a garantir infraestrutura adequada ao desenvolvimento humano e, também, uma preservação adequada do meio ambiente e dos recursos naturais. Dessa forma, destaca-se a importância de desenvolver e aplicar ferramentas adequadas para a contabilização dos potenciais impactos ambientais. O uso correto de tais informações tem o potencial de auxiliar em processos de tomada de decisões e favorecer ações capazes de mitigar impactos e danos ambientais.

Outra medida consolidada e difundida para a redução de impactos é a incorporação de resíduos de outros processos produtivos em novos materiais, como, por exemplo, na produção de cimento e blocos cerâmicos. Tal medida apresenta dois aspectos positivos, o primeiro, dar destinação a um resíduo, cuja reincorporação em novo ciclo elimina o impacto gerado por aterros, incinerações e outras formas de descarte. O segundo, evitar a extração de novas matérias-primas.

Também se verificam iniciativas de reutilização de elementos pré-existentes em novas edificações, como no projeto analisado. A reutilização permite o prolongamento da vida

útil de elementos, assim resultando em uma diminuição no consumo de novos recursos. Essa prática tem um grande potencial de reduzir os impactos atrelados a uma edificação, como ilustrado nos resultados deste trabalho. Todavia, sua viabilidade prática requer uma reestruturação na dinâmica de desmonte das atuais edificações. Atualmente, verifica-se que não há um planejamento do processo de desconstrução dos diversos sistemas, de modo a reaproveitar os materiais, transformá-los em matéria prima e evitar a geração de novos resíduos.

Outro modo de diminuir o impacto dos materiais empregados nas construções é priorizar materiais extraídos e produzidos em locais próximos da obra, pois, além de incentivar a economia local, é possível diminuir os impactos referentes ao transporte. Em categorias de impacto, como a do carbono incorporado, podem haver reduções significativas nos valores, principalmente naqueles devido às emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis empregados em larga escala no transporte rodoviário brasileiro.

Nos resultados encontrados, verifica-se que alguns materiais contam com altos valores para energia incorporada inicial, resultado de processos produtivos complexos e com consumo elevado de energia. Entretanto, em uma análise de todo o ciclo de vida da edificação, tais valores podem não se confirmar como destaques negativos. Isto porque uma maior energia incorporada inicial pode trazer benefícios para a fase operacional da edificação, melhorando, por exemplo, o desempenho térmico da mesma e otimizando o consumo energético para aquecimento e resfriamento da edificação. Considerando que a fase operacional da edificação é a mais longa, os resultados da redução de impactos podem ser bem significativos. Cabe a ressalva de que tais fatores devem ser analisados na etapa de projeto da edificação e devem ser coerentes com as demandas climáticas da região onde a edificação será implantada.

Por fim, destaca-se que a ausência de dados brasileiros e regionalizados pode ser uma barreira para a realização de estudos sobre impactos ambientais e também pode levar a variações nos resultados, devido a diferenças nas tecnologias empregadas nos processos produtivos, matriz energética e outros fatores locais. Assim, a análise da estimativa de impacto ambiental se faz necessária e, apesar de tais limitações, é preferível a não se dispor de embasamento para os processos de tomada de decisão. Os resultados são fundamentais para a otimização da análise de opções mais conscientes e coerentes com o contexto e a demanda.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14046: Gestão ambiental – Pegada hídrica – Princípios, requisitos e diretrizes. Brasil, 2014 p. 39.

CABEZA, L. F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. p. 394-416. 2014.

EUROPEAN STANDARDS. Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. EN 15978:2011.

HOEKSTRA, A.; CHAPAGAIN, A.; ALADAYA, M.; MEKONNEN, M. Manual de Avaliação da Pegada Hídrica: Estabelecendo o padrão global. Water Footprint Network, 2011. Disponível



em: <<http://ayhoekstra.nl/pubs/Hoekstra-et-al-2013-ManualDeAvaliacaoDaPegadaHidrica.pdf>>.

JONES, C., HAMMOND, G. ICE (Inventory of Carbon & Energy) V3.0 Beta - 9 August 2019. University of Bath. Disponível em:<<http://www.circularecology.com/contact.html>>.

KUHN, E.A. Avaliação da Sustentabilidade Ambiental do Protótipo de Habitação de Interesse Social Alvorada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRGS, Porto Alegre, 2006.

LAMENHA, A.; BAPTISTA, D.; SOUZA, G.; STEIN, M.; MAINARDI, M.; OLIVEIRA, T. CERES: Centro de Estudos Regenerativos e Sustentabilidade. Porto Alegre: UFRGS, 2019. Apresentação de trabalho final de disciplina. Arquivo digital fornecido pelos autores.

MARLAND, G.; BODEN, T.A; ANDRES, R. J. Global, Regional, and National CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Dep. of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2003.

RÖCK, M. et al. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*, v. 140, p. 153–161, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006>>.