



VIDA ÚTIL DE PROJETO E POTENCIAL DE SUSTENTABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO

Godoy, L. G. G.¹; Garcez, M. R.²

¹ MSc. Eng., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, luisgodoy.eng@gmail.com.

² Dr. Eng., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, monica.garcez@ufrgs.br.

RESUMO

Este trabalho busca mostrar, através de um estudo de caso, como a vida útil de projeto pode ser utilizada como estratégia para a redução de impactos ambientais gerados por estruturas de concreto armado. Os modelos para análise foram gerados a partir dos projetos estruturais elaborados para um edifício comercial de 30 pavimentos em concreto armado, considerando vidas úteis de projeto de 50 (Modelo I) e 100 (Modelo II) anos. Os impactos ambientais gerados pelos diferentes modelos estruturais nas fases de produção de materiais, construção da estrutura e fim de vida, foram quantificados através da aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Os resultados da ACV mostram que a etapa de produção dos materiais é a responsável pela maior parte dos impactos ambientais gerados por ambos os modelos. Os impactos ambientais quantificados para o Modelo I correspondem a 75-90% dos quantificados para Modelo II, e a diferença se torna menos expressiva para as categorias de impacto acidificação, depleção da camada de ozônio e mudanças climáticas. Este estudo de caso evidencia o potencial de redução dos impactos ambientais em estruturas de concreto armado com o aumento da vida útil de projeto.

ABSTRACT

This paper aims at showing, through a case study, how the design service life can be used as a strategy for the reduction of environmental impacts generated by reinforced concrete structures. The analyzed models correspond to the structural design of a reinforced concrete commercial building with 30 floors, considering design service lives of 50 (Model I) and 100 (Model II) years. The environmental impacts generated by the different models considering production of materials, construction and end of life phases were quantified through the application of Life Cycle Assessment (LCA). The LCA results show that the production of materials is responsible for most of the environmental impacts generated in both models. The environmental impacts quantified for Model I correspond to 75-90% of those quantified for Model II, and the difference becomes less significant for acidification, ozone depletion and climate change impact categories. This case study highlights the potential for reducing environmental impacts in reinforced concrete structures by increasing the design service life.



1 Introdução

A construção e a operação de edifícios representam 39% das emissões totais de CO₂ e cerca de 36% do consumo global de energia (UN, 2018). Seguindo essa tendência, Ghaffar et al. (2020) afirmam que mais de 35 bilhões de toneladas de material mineral são extraídos da terra por ano, tornando-se principalmente produtos e materiais usados na construção de edificações.

Considerando o cimento e o aço como os principais insumos na construção e manutenção dos edifícios, torna-se necessário conhecer o potencial de impacto relativo ao uso destes produtos. Dados da Agência Internacional de Energia (AIE) mostram que as emissões de CO₂ oriundas da indústria cimenteira correspondem a 0,54t para cada tonelada de cimento produzido (IEA, 2018). No Brasil, dados da Cement Sustainability Initiative (CSI) mostram que a indústria do cimento contribui com cerca de 0,60t de CO₂ para cada tonelada de cimento produzida no país, além de 4 milhões MWh por ano em energia para alimentar as plantas de fabricação (CSI, 2016). Em 2018 o consumo de cimento no Brasil ultrapassou 44 milhões de toneladas. (SNIC, 2018). Dados da comissão Europeia mostram que a produção de aço é responsável por uma parcela entre 6 e 7% das emissões globais de CO₂ (EC, 2019). No Brasil dados da indústria do aço mostram que em 2016 as emissões chegaram a 2t de CO₂ para cada 1 tonelada de todo o aço bruto produzido no país (CNI, 2018).

Diante deste cenário, este artigo investiga, através de um estudo de caso, como a variação da vida útil de projeto interfere nos impactos ambientais gerados pela estrutura de concreto armado.

2 Estrutura de concreto armado

Este estudo de caso avalia os impactos ambientais originados por uma edificação de concreto dimensionada considerando requisitos de durabilidade para uma vida útil de projeto de 50 e 100 anos. A edificação, de trinta pavimentos de uso comercial, foi dimensionada considerando uma variação na resistência de concreto ao longo da altura do edifício, conforme ilustra a Figura 1.

Para a primeira estrutura (M-I), dimensionada para uma vida útil de 50 anos, foram adotados os requisitos de durabilidade prescritos pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). Já para a segunda estrutura (M-II) foram utilizados os requisitos de durabilidade da norma britânica BS 8500 (BSI, 2016) para uma vida útil de 100 anos.

Com cerca de 345,60 m² (12,00 x 28,80 m) de área construída por pavimento, os modelos M-I e M-II foram projetados considerando a distribuição do concreto C50 da fundação até 13º pavimento, C40 entre o 14º e 22º pavimento, e C30 entre 23º e 30º pavimento (Figura 1).

O projeto estrutural foi elaborado e analisado por meio do software TQS V21 da fabricante TQS. Para modelagem do pórtico foi utilizado o modelo estrutural IV do software, onde cargas verticais e horizontais nos pilares e vigas foram calculados juntamente com o pórtico e para as lajes foram consideradas apenas os efeitos das cargas verticais.

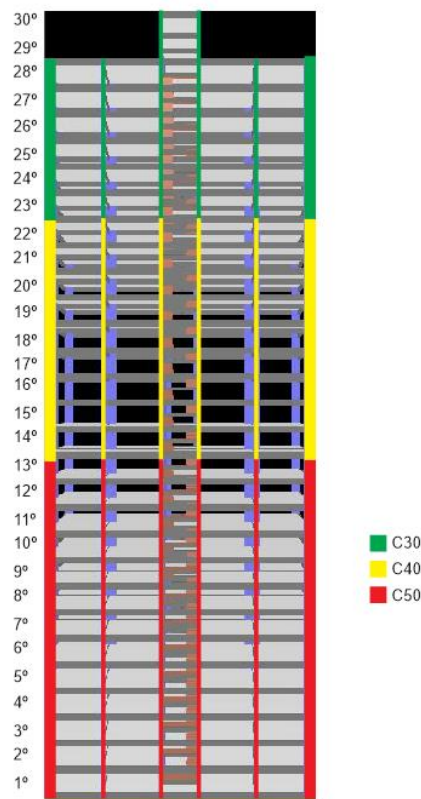


Figura 1 - Distribuição das resistências do concreto ao longo da altura do edifício.

Por se tratar de um edifício de uso comercial, carga de ocupação adotada para o projeto foi de $3,0 \text{ kN/m}^2$, seguindo o que recomenda a NBR 6120 (ABNT, 2019). As cargas horizontais decorrentes do vento foram ajustadas no software conforme estabelece a NBR 6123 (ABNT, 1988), onde para M-II, as cargas foram majoradas em função da vida útil adotada de 100 anos conforme recomendações da BS 8500 (BSI, 2016).

O modelo I foi considerado em ambiente urbano, classe de agressividade II segundo a NBR (ABNT, 2014), cujos requisitos de durabilidade para uma vida útil de 50 anos são: relação a/c em massa $\leq 0,60$, classe de resistência do concreto $\geq C25$, cobrimento nominal 25mm para laje, 30mm para viga/pilar e 30mm para elementos em contato com o solo. O modelo II seguiu os requisitos de durabilidade da BS 8500 (BSI, 2016) para uma vida útil de 100 anos em ambiente sujeito à corrosão induzida por carbonatação: para um cobrimento nominal de 40mm, classe de resistência do concreto 30/37, relação a/c em massa $\leq 0,55$, e consumo de cimento superior a 300 kg/m^3 , ou classe de resistência do concreto 35/45, relação a/c em massa $\leq 0,5$, e consumo de cimento superior a 320 kg/m^3 .

3 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) avalia os impactos ambientais gerados por um sistema ou produto ao longo de sua vida útil. Para avaliar os impactos ambientais gerados pelos modelos considerados neste trabalho foi adotada a metodologia recomendada pela ISO 14.040 (ISO, 2006). A análise foi realizada com auxílio do

software OpenLCA de acesso gratuito e código aberto, versão 1.7.2, produzido pela empresa Greendelta.

Paras as duas diferentes soluções a unidade funcional (UF) adotada é o sistema estrutural de um edifício comercial de 30 pavimentos. A Figura 2 apresenta as fronteiras do sistema.

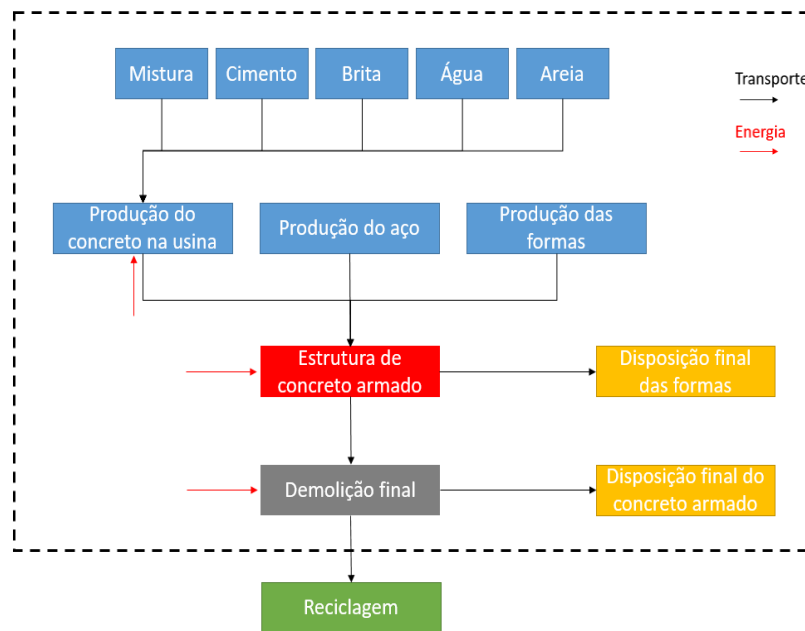


Figura 2 – Fronteiras do sistema.

Os dados foram obtidos a partir do banco de dados do Ecoinvent versão 3.5, a qual foi adaptada com objetivo de representar o contexto brasileiro. Em casos de ausência de dados regionais foram utilizados dados de outras regiões que representassem o mais próximo possível a condição regional da área de estudo (Tabela 1). Na análise foi utilizado o modelo cut-off, que considera que a produção primária de materiais é sempre alocada ao usuário primário do material.

A Tabela 2 mostra a quantidade de materiais utilizada para produção de 1 m³ concreto. Foram considerados o cimento CII-F com teor de filer entre 6 e 10%, brita basáltica com peso específico de 2,90g/cm³ e diâmetro máximo de 25mm, areia natural com peso específico de 2,63g/cm³ e finura de 2,4, aditivo superplastificante na proporção de 1,5% e incorporador de ar também na proporção de 1,5% em relação a massa de cimento.

A Tabela 3 apresenta as distâncias de transporte consideradas no estudo, tendo como referência fornecedores de insumos localizados o mais próximo possível do local onde seria construído o edifício.

A avaliação de impacto foi baseada no método CML (baseline), com as seguintes categorias de impacto: potencial de acidificação, mudança climática, potencial de eutrofização, ecotoxicidade aquática de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática marinha, oxidação fotoquímica, depleção estratosférica de ozônio e ecotoxicidade terrestre.



Tabela 1 – Banco de dados utilizado no inventário do ciclo de vida.

Processo	Fluxo de saída	Fluxo de entrada	Base de dados	Modelo I	Modelo II	Unidade
Produção de insumos	Concreto	Aditivo	5édium5izer production, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde 5édium5izer, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde cut-off, U – GLO	6,81	6,59	l
		Transporte do aditivo	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	6.689,27	7.253,96	t
		Água	tap water production, conventional treatment tap water cut-off, U – RoW	400,35	434,18	t
		Cimento	cement production, Portland cement, Portland cut-off, U – RoW	1.013,25	1.098,79	t
		Transporte do cimento até a planta de mistura	transport, freight train, diesel, with particle filter transport, freight train cut-off, U – RoW	1.013,25	1.098,79	t
		Brita	gravel production, crushed gravel, crushed cut-off, U – RoW	2.809,04	3.046,41	t
		Transporte da brita até a planta de mistura	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	2.809,04	3.046,41	t
		Areia	gravel and sand quarry operation sand cut-off, U – RoW	1.654,32	1.794,18	t
		Transporte da areia até a planta de mistura	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	1.654,32	1.794,18	t
		Energia de mistura	electricity voltage transformation from high to 5édium voltage electricity, 5édium voltage cut-off, U – BR	7.536	8.172,80	kWh
Armadura	Aço para armadura	reinforcing steel production reinforcing steel cut-off, U – RoW	255,70	357,68	t	
Formas	Madeira para formas	plywood production, for outdoor use plywood, for outdoor use cut-off, U – RoW	9.772	10.069,50	m ²	
Construção da estrutura	Transporte dos insumos até a planta de trabalho	Transporte do concreto da planta de mistura para planta de trabalho	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	2.355	2.554	m ³
		Transporte do aço da fábrica para a planta de trabalho	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	255,70	357,68	t
		Transporte da madeira da fábrica para a planta de trabalho	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	73,30	75,52	t
	Água para cura do concreto	Água da rede para cura do concreto	tap water production, conventional treatment tap water cut-off, U – RoW	4.046,40	4.046,40	l
	Lançamento do concreto	Diesel para lançamento do concreto	diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW cut-off, U – GLO	11.775	12.770	kWh
	Adensamento do concreto	Eletricidade para adensamento do concreto	electricity voltage transformation from high to 5édium voltage electricity, 5édium voltage cut-off, U – BR	70.650	76.620	kWh
	Disposição final das formas	Disposição final das formas	treatment of waste fibreboard, collection for final disposal waste fibreboard cut-off, U – RoW	73,30	75,52	t
Transporte das formas de madeira para aterro de materiais inertes		transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	73,30	75,52	t	
Fim de vida	Demolição e disposição final	Diesel para demolição da estrutura em concreto armado	diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U – GLO	759.487,50	823.665	kWh
		Diesel para carregamento no local de demolição	diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U – GLO	23.550	25.440	kWh
		Transporte do resíduo de concreto armado para aterro de material inerte	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RoW	5.887,50	6.385	t
		Disposição final do concreto e aço	treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal waste reinforced concrete cut-off, U – RoW	5.887,50	6.385	t

Tabela 2 – Proporção de mistura para os concretos C30, C40 e C50.

Concreto	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Relação A/C	Aditivo (l/m ³)
C30	314,81	798,86	1192,8	0,54	1,89
C40	404,76	723,76	1192,8	0,42	2,43
C50	500	644,24	1192,8	0,34	3,00

Tabela 3 – Distâncias de transporte.

	Transporte	Distância (km)
Transporte do aditivo da fábrica para a planta de mistura	Caminhão 27t	1.100
Transporte do cimento da fábrica para a planta de mistura	Caminhão 27t	950
Transporte de sílica da fábrica para a planta de mistura	Caminhão 27t	1.200
Transporte da brita para a planta de mistura	Caminhão 27t	60
Transporte da areia para a planta de mistura	Caminhão 27t	100
Transporte do concreto da planta de mistura para a obra	Caminhão 27t	20
Transporte do aço da fábrica para a obra	Caminhão 27t	30
Transporte de madeira da fábrica para a obra	Caminhão 27t	750
Transporte para disposição final do aço e concreto	Caminhão 27t	30

4 Resultados

Os impactos ambientais relativos, originados pelos dois modelos estruturais, são apresentados na Figura 3 e Tabela 4, onde o valor 1,0 foi atribuído a cada categoria de impacto para o Modelo II e foram então calculados os valores proporcionais para o modelo I. As cores verde, azul e amarelo na Figura 3 correspondem aos processos de produção de insumos, construção da estrutura e fim de vida, descritos na Tabela 1.

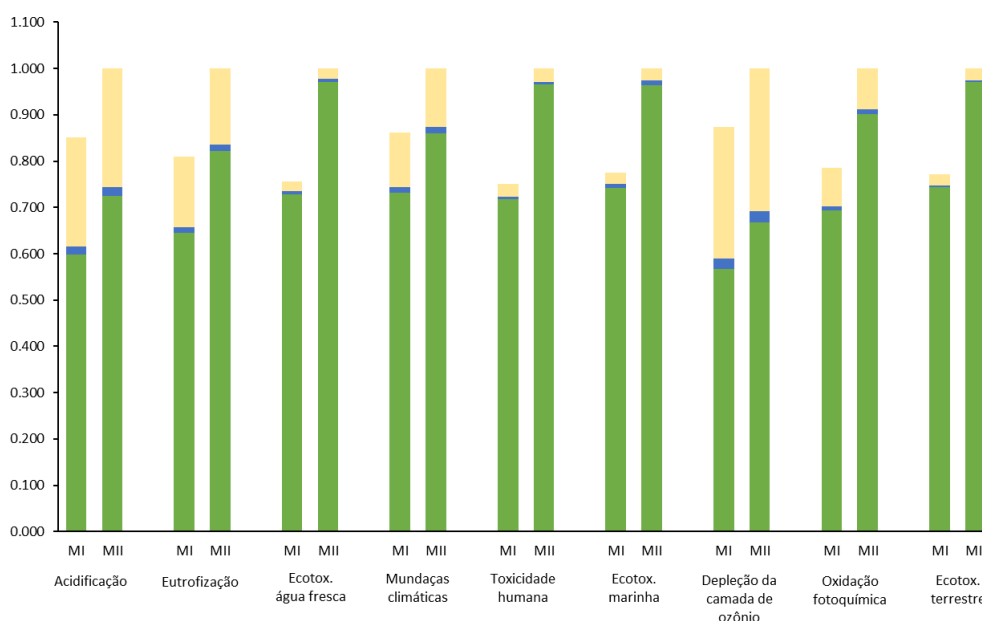


Figura 3 - Impactos ambientais relativos para os modelos I e II, por processo.

Tabela 4 – Impactos ambientais originados pelos Modelos I e II.

Categorias de impacto	Modelo	Produção de insumos	Processos			Total
			Construção da estrutura	Fim de vida		
Acidificação	I	0,599	0,017	0,236	0,85	
	II	0,725	0,019	0,256	1,00	
Eutrofização	I	0,646	0,012	0,152	0,81	
	II	0,822	0,013	0,165	1,00	
Ecotoxicidade - água doce	I	0,729	0,006	0,021	0,76	
	II	0,971	0,007	0,022	1,00	
Mudanças climáticas	I	0,731	0,013	0,117	0,86	
	II	0,859	0,014	0,127	1,00	
Toxicidade humana	I	0,718	0,005	0,027	0,75	
	II	0,965	0,005	0,029	1,00	
Ecotoxicidade - marinha	I	0,743	0,009	0,024	0,77	
	II	0,964	0,009	0,026	1,00	
Depleção da camada de ozônio	I	0,567	0,022	0,284	0,87	
	II	0,667	0,024	0,309	1,00	
Oxidação fotoquímica	I	0,693	0,010	0,082	0,78	
	II	0,901	0,010	0,089	1,00	
Ecotox. terrestre	I	0,745	0,003	0,023	0,77	
	II	0,971	0,004	0,025	1,00	

Os dados apresentados na Figura 3 confirmam que a etapa de produção de insumos é responsável por mais de 50% dos impactos ambientais gerados por ambos os modelos, nas nove categorias (Figura 4). Dados apresentados por Jeong et al. (2012) e Hui Li et al. (2019) mostram que a produção de aço e concreto podem representar até 80% das emissões totais de CO₂ em edifícios de concreto armado, corroborando com os resultados apresentados neste estudo de caso.

Horáková et al. (2019) comprovam a participação decisiva dos materiais cimentícios nos impactos relacionados a mudanças climáticas e depleção da camada de ozônio. De fato, as plantas fabricação do cimento Portland contribuem de forma expressiva para a depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas e acidificação. Petrovic et al. (2019) destacam que o concreto é um dos materiais que apresentam maior contribuição para as taxas de emissão de CO₂. Esta condição se dá principalmente em função da matriz energética utilizada nas plantas de fabricação de cimento Portland. Em 2014 a produção global de cimento consumiu 10.8 EJ de energia, 63% da queima de carvão, 13% eletricidade e 10% pela queima de óleo (IEA, 2018).

Apesar de ambos os modelos utilizarem concreto de mesmo f_{ck} , é importante destacar que os requisitos de durabilidade da estrutura projetada para 100 anos (modelo II) resultaram em um aumento nas dimensões dos elementos estruturais, o que resultou em um consumo de cimento mais elevado. Da mesma forma, a quantidade de aço utilizada no modelo II foi superior ao do modelo I, resultando em um acréscimo nos impactos ambientais.

No modelo I, onde foram considerados requisitos de durabilidade para atender uma vida útil de 50 anos, resultou em menores impactos ambientais nas nove categorias consideradas neste estudo (Figura 4). Entretanto, para as categorias de depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas e acidificação, os impactos originados pelo modelo I se aproximam consideravelmente dos gerados pelo modelo II. Desta forma, como bem observado por Horáková et al. (2019) as considerações relativas à durabilidade e vida útil das estruturas podem contribuir na redução dos impactos ambientais gerados ao longo da vida útil das estruturas.

De fato, considerando que o modelo II foi dimensionado para uma vida útil de projeto de 100 anos, esta estrutura geraria menos impactos ambientais ao longo de sua vida útil do que a estrutura projetada para 50 anos. Esta condição também foi observada por Aljundi et al., (2019) que classificam projetos com vida útil de 100 anos como de maior consumo de materiais, porém com melhor performance ambiental em relação a estruturas com 50 anos de vida útil de projeto. Assim, a consideração da vida útil na etapa de projeto de estruturas de concreto armado pode ser considerada como um importante fator do ponto de vista ambiental.

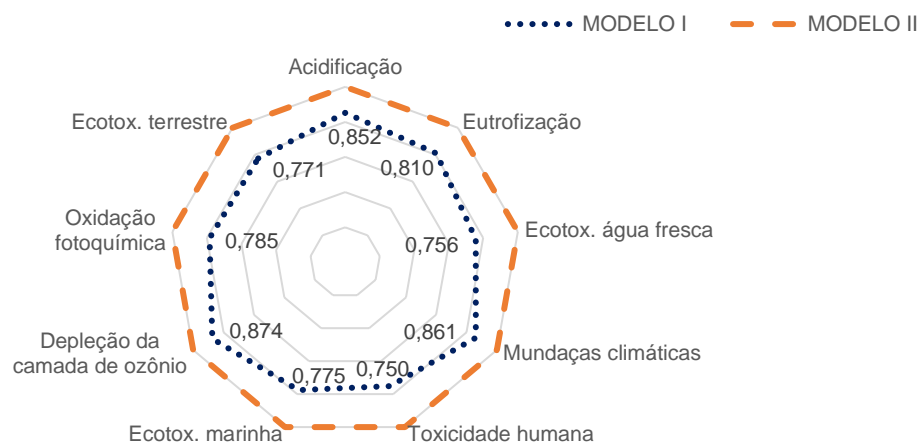


Figura 4 - Impactos ambientais relativos para os modelos I e II.

5 Conclusões

A etapa de produção de insumos é o principal responsável pelos impactos ambientais nos dois modelos estudados, independentemente da vida útil de projeto adotada. O menor consumo de materiais no modelo I resultou em menores impactos ambientais nas categorias de impacto estudadas. Por outro lado, o modelo II, por possuir uma vida útil de projeto de 100 anos, apresentou melhor performance ambiental.

A combinação entre a metodologia de ACV e a modelagem estrutural de edifícios, permite ainda na etapa de projeto o ajuste de parâmetros que podem contribuir para a redução dos impactos ambientais gerados pelas estruturas. Dessa forma torna-se fundamental a associação entre metodologia de ACV e softwares de modelagem estrutural, com objetivo de aumentar o potencial de sustentabilidade das estruturas de concreto armado.



Referências

AGENCY, International Energy. World Energy Outlook 2017. Paris: Iea, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>>. Acesso em: 05 maio 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: Abnt, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: Abnt, 1988. 3 p.

ALJUNDI, Kamar et al. LCA Integration in the Construction Industry: A Case Study of a Sustainable. Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of SEB 2019, v. 163, p. 159, 2019.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI 8500: Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206. Method of specifying and guidance for the specifier. London: Bsi, 2016. 66 p.

COMMISSION, European. Energy Efficiency and CO2 reduction in the Iron & Steel Industry. Bruxelles: Ec, 2019. Disponível em: <<https://setis.ec.europa.eu/newsroom/library/technology-information-sheets/energy-efficiency-and-co2-reduction-in-the-iron-steel-industry/view>>. Acesso em: 08 jul. 2019.

CSI. Cement Sustainability Initiative. Duesseldorf: WbcSD, 2016. Disponível em: <<https://www.wbcSDcement.org/>>. Acesso em: 12 nov. 2019.

GHAFFAR, Seyed Hamidreza; BURMAN, Matthew; BRAIMAH, Nuhu. Pathways to circular construction: an integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 244, p. 118710, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019>.

HORÁKOVÁ, A.; BROUKALOVÁ, I.; KOHOUTKOVÁ, A. Choice of Sustainable and Durable Concrete Structure Using LCA. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. p. 012016.

INDÚSTRIA, Confederação Nacional da. Mudança do clima e indústria brasileira. Brasília: Cni, 2018. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/images/Mudan%C3%A7a_do_Clima_e_Industria_Brasileira.pdf>. Acesso em: 05 maio 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14.040: Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. Geneva: Iso, 2006. 20 p.

JEONG, Young-sun; LEE, Seung-eon; HUH, Jung-ho. Estimation of CO2 emission of apartment buildings due to major construction materials in the Republic of Korea. Energy And Buildings, [s.l.], v. 49, p.437-442, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.041>.



LI, Hui et al. Assessing the life cycle CO₂ emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China. *Journal of cleaner production*, v. 210, p. 1496-1506, 2019.

PETROVIC, Bojana et al. Life cycle assessment of building materials for a single-family house in Sweden. *Energy Procedia*, v. 158, p. 3547-3552, 2019.

SNIC. Produção nacional de cimento por regiões e estados. Rio de Janeiro: Snic, 2018. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 15 ago. 2019

United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2018. Nairobi: Un, 2018. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2018>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

YANG, Dong et al. Comparative study of cement manufacturing with different strength grades using the coupled LCA and partial LCC methods—A case study in China. *Resources, Conservation And Recycling*, [s.l.], v. 119, p.60-68, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.017>.

ZHANG, Xiaocun; WANG, Fenglai. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China. *Building And Environment*, [s.l.], v. 86, p.89-97, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.003>. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.003>>. Acesso em: 10 jul. 2019.