

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO POR CONCRETO ARMADO UTILIZADO EM PONTES

ENVIRONMENTAL IMPACT EVALUATION CAUSED BY REINFORCED CONCRETE USED IN BRIDGES

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PROVOCADO POR EL HORMIGÓN ARMADO UTILIZADO EN PUENTES

GLÁUCIA NOLASCO DE ALMEIDA MELLO, Dra. | PUC-MINAS - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
LUCAS LOPES DE CARVALHO PENA | PUC-MINAS - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
LEONARDO MINDÉLLO MUSCHIONI | PUC-MINAS - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

RESUMO

O presente trabalho avalia o impacto ambiental causado por obras de arte especiais (OAE), neste caso, quatro pontes de concreto armado. O principal objetivo foi a avaliação dos impactos considerando o processo de produção de elementos estruturais de concreto armado. As pontes são obras de infraestrutura de cidades e rodovias essenciais para a economia da sociedade. Não há muitos estudos que apresentem resultados de avaliação de impactos ambientais causados por essas construções. Neste contexto, a pesquisa se ateve à avaliação da fase pré-operacional do objeto que visa levantamento dos consumos de materiais utilizados na construção dos elementos estruturais dessas OAE. Utilizou-se da abordagem quantitativa-qualitativa por meio do programa OPENLCA versão 1.11.0 e a base de dados ecoinvent35_APOS_UP_20181210 fornecida pela Ecoinvent. Foi realizada a análise dos impactos apenas para o compósito concreto armado. Nesta análise, tanto o aço quanto o concreto apresentaram contribuição significativa para a degradação do meio ambiente. Percentualmente, o aço se sobressai ligeiramente, sendo responsável por 52,7% das contribuições computadas, enquanto o concreto se responsabiliza por 47,3%.

PALAVRAS-CHAVE

Avaliação do Ciclo de Vida; impacto ambiental; concreto armado; pontes.

ABSTRACT

This paper evaluates the environmental impact caused by special structures, in this case, four reinforced concrete bridges. The main objective was to evaluate the impacts considering the production process of their structural elements of reinforced concrete. Bridges are very important infrastructure construction of cities and highways, and they are essential for economy of society. There are not many studies that present results of evaluation of environmental impacts caused by these constructions. In this context, the research was focused on the evaluation of the pre-operational phase of the object that aims to survey the consumption of materials used in the construction of the structural elements of them. A quantitative-qualitative approach was used through the OPENLCA program version 1.11.0 and the database ecoinvent35_APOS_UP_20181210 provided by Ecoinvent. The analysis of the impacts was performed only for the reinforced concrete composite. In this analysis, both steel and concrete presented significant contribution to the degradation of the environment. Percentage wise, steel stands out slightly, being responsible for 52.7% of the contributions computed, while concrete is responsible for 47.3%.



KEYWORDS

Life Cycle Assessment; environmental impact; reinforced concrete; bridges.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el impacto ambiental causado por obras especiales (OE), en este caso, cuatro puentes de hormigón armado. El objetivo principal fue evaluar los impactos de ellas considerando el proceso de producción de los elementos estructurales de hormigón armado. Los puentes son obras de infraestructura de las ciudades y carreteras esenciales para la economía de la sociedad. No existen muchos estudios que presenten resultados de evaluación de los impactos ambientales causados por estas construcciones. En este contexto, la investigación se centró en la evaluación de la fase preoperativa del objeto que tiene por objeto estudiar el consumo de materiales utilizados en la construcción de elementos estructurales de estas OE. Se utilizó un enfoque cuantitativo-cualitativo a través del programa OPENLCA versión 1.11.0 y la base de datos ecoinvent35_APOS_UP_20181210 proporcionada por Ecoinvent. El análisis de los impactos se realizó únicamente para el compuesto de hormigón armado. En este análisis, tanto el acero como el hormigón presentaron una contribución significativa a la degradación del medio ambiente. Porcentualmente, el acero destaca ligeramente, siendo responsable del 52,7% de las contribuciones computadas, mientras que el hormigón es responsable del 47,3%.

PALABRAS CLAVE

Evaluación del ciclo de vida; impacto ambiental; hormigón armado; puentes.

1. INTRODUÇÃO

A Diretoria Executiva do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) relata o aumento das emissões no setor da construção civil em 2019, entretanto, para atingir a neutralidade de emissões até 2050, a Agência Internacional de Energia (AIE) estima que as emissões diretas de CO₂ dos edifícios precisam cair 50% até 2030 e as indiretas do setor de construção precisam cair 60% até o mesmo ano. Para alcançar esse objetivo há necessidade de concentração em estratégias que reduzam a demanda de energia no ambiente construído, tais como, descarbonizar o setor energético e utilização de materiais que reduzam as emissões de carbono do ciclo de vida (UNITED NATIONS ORGANIZATION, 2020; JORDAN et al., 2020).

No Brasil em 2016, o setor da produção de cimento contribuiu em 24,9% dos totais das emissões de gases do efeito estufa e o setor da metalurgia, que além de fabricar outros metais fabrica o aço utilizado no concreto armado, foi responsável por 48,2% das emissões totais desses gases (BRASIL, 2020).

Na construção civil, o composto concreto armado (concreto + aço) é o material mais consumido no mundo. Ele é utilizado desde a construção de edifícios até obras de arte especiais (OAE), como as pontes, por exemplo. As pontes desempenham um papel no desenvolvimento social e econômico das comunidades, funcionando como um meio de comunicação entre as pessoas e permitindo a circulação de bens, mercadorias e serviços (CHEN et al., 2021). Ao se projetar uma ponte espera-se que ela desempenhe as funções para as quais foi concebida durante um período aproximado de cem anos, estimando-se para isso apenas manutenções preventivas.

Com a metodologia de análise do ciclo de vida (ACV) é possível identificar e compreender os potenciais impactos ambientais do ciclo de vida de um produto. Contudo, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) afirma que não existe um método único para se conduzir uma ACV, e cada organização tem a flexibilidade para implementar a ACV. Segundo a mesma norma (ABNT, 2009a), a metodologia de ACV é aberta à inclusão de novas descobertas científicas e de melhorias da técnica.

Além disso, não existe base científica para a redução dos resultados obtidos por meio da ACV a um valor único e, assim, cabe análise e tomada de decisão de cada setor ou empresa para intervir nesses valores. Portanto, diversos pesquisadores têm aplicado a ACV para avaliar o impacto de materiais alternativos que possam substituir os

mais impactantes no ambiente.

Por exemplo, para tentar abaixar as taxas de emissão de CO₂, grupos de pesquisadores têm trabalhado em projetos que analisam composições diferentes para o concreto, incluindo análise por meio de ACV. Pradhan, Poh e Qian (2022) avaliaram a substituição de parte do clínquer utilizado na fabricação do cimento por materiais suplementares: cinzas volantes, escória granulada moída de alto-forno e argila de calcário calcinado. Na análise dos autores a escória granulada moída de alto-forno apresentou índices de impacto ambiental mais baixos que os obtidos para a argila de calcário calcinado. No entanto, ao ser considerada a vida útil no limite do sistema (do berço ao túmulo) o concreto produzido com argila de calcário calcinado resultou em menor impacto ambiental em todas as categorias (exceto acidificação e ecotoxicidade terrestre).

Segundo Marinkovic, Carevic e Dragaš (2021), na avaliação comparativa do ACV de estruturas de concreto é muito importante levar em consideração a equivalência funcional das alternativas comparadas. Assim, torna-se difícil a comparação entre concreto convencional e ecológico, uma vez que eles têm diferentes propriedades mecânicas e de durabilidade. Em decorrência disso, as estruturas correspondentes têm resistência e vida útil diferentes. Contudo, há duas abordagens possíveis: a correção do funcional do volume unitário ou a correção dos impactos ambientais calculados com a resistência à compressão e a durabilidade considerada, se a unidade funcional tiver o mesmo volume. Os autores aplicaram a metodologia ACV em 94 misturas diferentes de pesquisas experimentais relatadas e com os seguintes impactos ambientais calculados: mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, criação fotoquímica-oxidante e esgotamento abiótico de combustíveis fósseis. Os resultados mostraram que a modelagem da ACV baseada na abordagem de correção da resistência e durabilidade comparada aos resultados baseados em unidades com o mesmo volume, pode originar conclusões diferentes. Dessa forma, os autores concluíram que a melhor forma de avaliação seria considerar conjuntamente os aspectos estruturais, ambientais e econômicos.

Tendo isso em vista, com essa investigação pretendeu-se responder à pergunta: dentre os materiais concreto e aço utilizados na construção de obras de arte especiais, neste caso, as pontes, qual deles causa o maior impacto ambiental?

Assim, esta pesquisa foi conduzida com o principal objetivo de realizar avaliações quantitativas de alguns indicadores de impacto ambiental em função do processo de

produção dos elementos de concreto armado de quatro pontes. Pretendeu-se, ainda, analisar quantitativa e qualitativamente o potencial do impacto ambiental do concreto e do aço utilizado nessas construções. A metodologia adotada foi a ACV conduzida com o auxílio do programa OpenLCA.

2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma abordagem relativa, estruturada em torno de uma unidade funcional que é o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência. O sistema de um produto compreende um conjunto de processos elementares que desempenham uma ou mais funções definidas e modela o ciclo de vida de um produto. Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), ACV é um processo que engloba um conjunto de atividades interativas que transformam entradas em saídas. Esse processo ocorre por meio de dois fluxos: de produto e elementar. O primeiro diz respeito ao material ou energia retirada do meio ambiente que não sofre transformação por interferência humana quando entram no sistema em estudo, ou material ou energia que ao saírem do sistema não sofrem transformação causadas por interferências humanas. O segundo é relativo ao fluxo do produto, matéria-prima ou energia que deixa um processo elementar, menor elemento considerado na avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV).

De acordo com a ABNT (2009a), a realização de uma ACV deve conter as seguintes fases: (I) análise de inventário; (II) avaliação de impactos; e (III) interpretação.

2.1. Análise de inventário

O método de AICV tem como função avaliar as liberações de inventário de acordo com os padrões normativos, resultando em indicadores de impacto relacionados à saúde humana, ao ecossistema e ao esgotamento de recursos (DU, 2015). Os dados fornecidos pelo banco de dados de inventário do ciclo de vida (ICV), que compreende milhares de conjuntos de processos, seriam atribuídos apenas aos cenários selecionados.

A análise de inventário do ciclo de vida (ICV) consiste no levantamento de entradas e saídas em processos e produtos dentro da fronteira delimitada do sistema, ponderando os resultados pela unidade funcional adotada (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002). Além disso, o processo de realização da ACV é iterativo e, à medida que se conhece melhor o processo estudado, novos detalhes

podem ser observados. Portanto, mudanças nos procedimentos, na coleta de dados ou nas premissas adotadas na etapa de definição de objetivo e escopo podem ser necessárias (ABNT, 2009a).

A análise de ICV é composta por etapas de coleta dos dados, alocação e procedimentos de cálculo, conforme ilustra a Figura 1.

Os dados a serem incluídos no inventário devem ser coletados para cada processo, e esses são utilizados para quantificar as entradas e saídas de um processo. Todos os dados obtidos devem ser devidamente referenciados. Todas as informações a respeito dos dados coletados devem ser detalhadas para melhor análise do estudo (ABNT, 2009b).

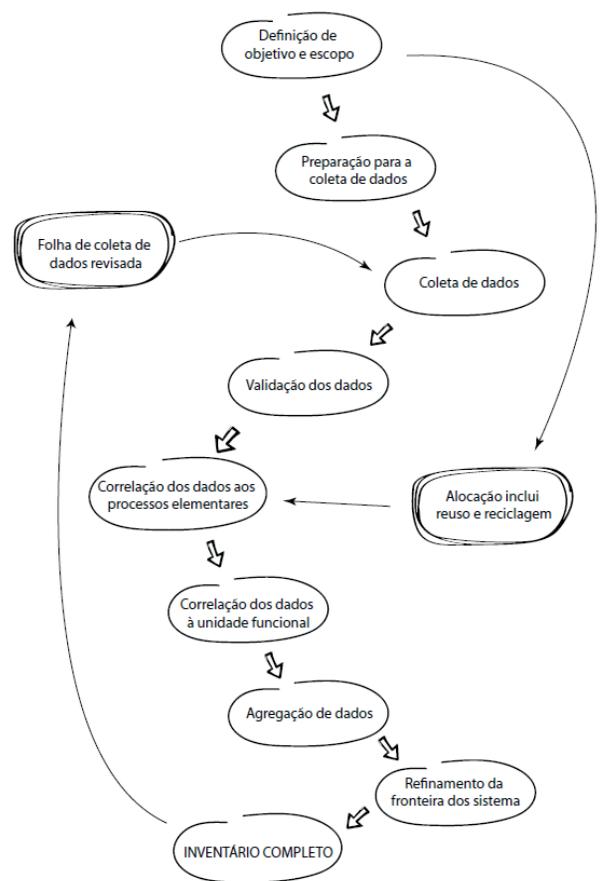


Figura 1: Procedimentos para análise de inventário.
Fonte: Adaptado da NBR ISO 14044:2009 (ABNT, 2009b).

Com a validação dos dados, o próximo passo é computar os quantitativos de entrada e saída do processo elementar. Ao realizar o cálculo dos fluxos é necessário referenciar os dados de entrada e saída em relação à unidade funcional. Dessa forma, é possível agregar as entradas e saídas no sistema de produto. O nível de agregação deve ser consistente com o objetivo do estudo. Convém que

os dados sejam agregados somente se estiverem relacionados a substâncias equivalentes e impactos ambientais semelhantes.

Finalmente, após realizar todas essas etapas, é necessário reavaliar e refinar todas as fronteiras do sistema de tal forma a considerar a possível exclusão de processos do ciclo de vida. A exclusão será determinada por meio de uma análise de sensibilidade que consiste no processo para verificar se as informações obtidas são relevantes para as conclusões da investigação (ABNT, 2009b).

2.2. Avaliação de impactos

É a fase da avaliação do impacto do ciclo de vida que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida (ABNT, 2009b). A AICV é a etapa na qual os resultados do ICV são avaliados e os impactos ambientais são classificados em diferentes categorias (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002).

Categorias de impacto são diferentes áreas de interesse para classificar impactos ambientais em uma unidade funcional. A seleção das categorias de impacto depende dos objetivos e escopo da ACV, além da aplicação do estudo. Diferentes metodologias podem ser aplicadas numa ACV, dependendo de premissas adotadas e do objetivo final do estudo (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014).

A AICV trata-se de uma abordagem relativa baseada em um sistema de produto com desempenho quantificado (unidade de referência). Os elementos obrigatórios que uma AICV deve conter, segundo ABNT (2009b) são: (I) definição dos indicadores de impacto por categoria e caracterização; (II) correlação os resultados do ICV com as categorias de impacto; e (III) cálculo dos indicadores de categoria.

2.3. Interpretação

A interpretação do ciclo de vida é a análise dos dados obtidos para tomadas de decisões e recomendações de melhorias no desempenho da avaliação do ciclo de vida do concreto (ISLAM; JOLLANDS; SETUNGE, 2015). Na fase de interpretação do ciclo de vida de um estudo de ACV deve-se: (I) identificar questões significativas com os resultados das fases de ICV e AICV; (II) realizar uma avaliação do estudo após análise de sensibilidade e consistência; (III) elaborar conclusões, limitações e recomendações (ABNT, 2009b). Convém que os resultados do ICV sejam

interpretados com cuidado, uma vez que eles se referem aos dados de entrada e saída e não aos impactos ambientais. Incertezas podem ser introduzidas nos resultados de um ICV devido aos efeitos combinados dessas nas entradas e variabilidades dos dados (ABNT, 2009b).

Para avaliar o ciclo de vida há uma metodologia denominada IMPACT World+. Esse método consiste basicamente em 4 pilares que se complementam no intuito de expressar um perfil de avaliação do impacto do ciclo de vida, de acordo com Bulle et al. (2019). Tem-se no Quadro 1 os pilares dessa metodologia, como segue:

ponto de vista midpoint, segundo Bare et al. (2000), o midpoint é um critério dentro do fluxo de causa e efeito de emissões para um determinado grupo de impacto, ou seja, fundamentalmente é uma abordagem voltada ao problema;

ponto de vista do nível do dano causado;

ponto de vista de impacto em áreas de preocupação (AoC, Area of Concern), sendo, saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos e serviços do ecossistema. Esse último considera potenciais impactos na sociedade sem consequências diretas para a saúde humana, com foco especificamente no valor instrumental dos recursos e ecossistemas, conforme recomendado pelo UNEP; SETAC Life Cycle Initiative (VERONES et al., 2017). Esse ponto de vista tem por objetivo estimar os custos que a sociedade terá de arcar para manter ou substituir possíveis perdas de um recurso ou ecossistema;

ponto de vista de danos em AoCs, que agrupa as categorias de impacto relacionados à água, ao carbono e o restante dos itens dentro do grupo de danos à saúde humana e qualidade do ecossistema.

2.4. Programas de cálculo

A ACV pode ser produzida com o auxílio de programas comerciais ou não, associados a bancos de dados disponíveis, tais como SimaPro (www.pre.nl), Gabi (www.gabi-software.com), Athena (www.athenaSMI.ca), TEAM (www.ecobilan.com), JEMAI (www.jemai.or.jp/english/index.cfm); OpenLCA (<https://www.openlca.org/openlca/>) e bancos de dados LCI Ecoinvent (www.pre.nl/ecoinvent), ELCD (<http://lca.jrc.ec.europa.eu>), BEES (www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm), SICV Brasil (<https://sicv.acv.ibict.br/Node/elementaryFlowList.xhtml?stock=default>).

A base de dados Ecoinvent possibilita que se extraia entendimento mais aprofundado a respeito dos impactos ambientais de produtos e serviços. Essa base incorpora

	Indicador do midpoint	Indicador do nível de impacto	Danos em AoP	Danos em AoC
	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4
	Mudança Climática De Curto Prazo	Mudança Climática, Saúde Humana	Saúde humana	Água
	Mudança Climática De Longo Prazo	Mudança Climática, Qualidade Do Ecossistema		
	Destruição Da Camada De Ozônio	Acidificação Marinha		
	Acidificação De Água	Destruição Da Camada De Ozônio		
Emissão	Acidificação Terrestre	Acidificação De Água	Qualidade do ecossistema	Carbono
CO ²	Eutrofização De Água	Acidificação Terrestre		
CFC10	Eutrofização Marinha	Eutrofização De Água		
FOSFATO	Ecotoxicidade De Água Doce	Eutrofização Marinha		
Dióxido de nitrogênio	Câncer De Toxicidade Humana	Ecotoxicidade De Água Doce		
Cromo	Toxicidade Humana Não Câncer	Câncer De Toxicidade Humana		
Pesticida	Formação De Material Particulado	Toxicidade Humana Não Câncer		
Partículas	Formação De Oxidante Fotoquímico	Formação De Material Particulado		
Urânio 238	Radiações Ionizantes	Formação De Oxidante Fotoquímico		
Água de refrigeração	Uso De Recursos Minerais	Radiações Ionizantes, Saúde Humana		
	Uso De Recursos Fósseis	Radiações Ionizantes, Qualidade Do Ecossistema	Recursos e serviços ecossistêmicos	
Extração		Água Termicamente Poluída		
Minério de ferro	Escassez De Água	Disponibilidade De Água, Saúde Humana		
Óleo cru	Biodiversidade De Transformação Da Tera	Disponibilidade De Água, Ecossistema Terrestre		
Lençóis freáticos	Biodiversidade De Ocupação Da Tera	Disponibilidade De Água, Ecossistema De Água		
Terra arável		Transformação De Terra, Biodiversidade		
E centenas mais ...		Ocupação De Terra, Biodiversidade		

Quadro 1: Estrutura Impact World+.
Fonte: Adaptado Bulle et al. (2019)

um repertório de dados que possui tipos distintos de setores, tanto em nível global, como regional. Atualmente, ela possui mais de 18.000 atividades e produtos, também conhecidos como “conjunto de dados”. Por meio da modelagem do comportamento humano, os conjuntos de dados conseguem prover base sobre o processo industrial ou agrícola, mensurando recursos naturais extraídos do meio ambiente, estimando as emissões relacionadas com a água, solo e ar, além de produtos que exigem outros processos, eletricidade por exemplo, e alguns dos indicadores com maior impacto em relação a sustentabilidade, produtos, coprodutos e resíduos de produção.

Com o intuito de disponibilizar dados de qualidade e de forma variada, os conjuntos possuem informações para as mais diversas áreas geográficas, tendo parâmetros também para representar conjunto de dados para praticamente todas as atividades de forma global, ou seja, uma estimativa média da produção global de um determinado produto ou serviço. Para cada conjunto de dados na base Ecoinvent, estão disponíveis pontuações de AICV para diversos métodos de qualificação do impacto (como IPCC ou EF v3.0) e atividades de impacto correspondentes (como mudança climática, toxicidade humana, uso da água ou uso da terra). Mediante a estrutura do banco de dados é possível que sejam rastreados os impactos dos produtos de toda cadeia de suprimentos, tendo critérios suficientes para interpretação e entendimento dos resultados.

Com a definição do banco de dados a ser utilizado, deve-se integrar os dados intermediados por um programa que possa compatibilizar e processar os resultados. Por

meio do programa há a possibilidade de combinar bases de dados amplas e extensas. As ferramentas de ACV incluem vários métodos de AICV que facilitam o cálculo dos impactos ambientais. Um método AICV é fundamentalmente uma lista de fatores de caracterização para os tipos de fluxos. Esses fatores traduzem os resultados do conjunto de dados na forma de impacto ambiental. Utilizados de forma conjunta, a ferramenta ACV consiste em basicamente três elementos distintos: (I) banco de dados ICV; (II) programa de aplicação; e (III) Métodos AICV.

O banco de dados de ICV e os métodos AICV devem ser integrados ao programa. Ademais, os fatores de caracterização dos métodos citados devem ser devidamente mapeados para os fluxos dos conjuntos de dados.

O programa OpenLCA se tornou público em 2006 e foi criado por Jutta Hildenbrand, Michael Srocka, Andreas Ciroth na Alemanha (GREENDELTA, 2022). É um programa gratuito com código aberto sem nenhum custo de licença e totalmente transparente, porém as principais bases de dados são pagas e apresentam custos para atualização. Funciona de modo iterativo, construído para uma estrutura modular para avaliar e modelar o ciclo de vida tanto para modelos simples quanto para modelos complexos. Entre as principais facilidades estão o custo baixo, compatibilidade com diversos sistemas operacionais e pode ser personalizado de acordo com demandas específicas. No Brasil, o programa atende às exigências de projetos de ACV, seguindo as normativas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b).

OAE	Características	
Ponte 1	Vão central	24,0 m
	Balanços	2 x 2,95 m
	Extensão total	29,9 m
	Pista	2 x 3,5 m
	Acostamento	2 x 2,0 m
	Barreiras New Jersey	0,40m x 0,87m
	Largura total	11,8 m
Ponte 2	Vão central	27,90m
	Balanços	2 x 4,075 m
	Extensão total	36,55 m
	Pista	2 x 3,5 m
	Acostamento	2 x 2,0 m
	Barreiras New Jersey	0,40m x 0,87m
	Largura total	11,8 m
Ponte 3	Vão 1	15,0 m
	Vão 2	30,0 m
	Extensão total	45,0 m
	Pista	2 x 3,5 m
	Acostamento	2 x 2,0 m
	Barreiras New Jersey	0,40m x 0,87m
	Largura total	11,8 m
Ponte 4	Vão 1	18,5 m
	Vão central	40,0 m
	Vão 2	18,5 m
	Extensão total	77,0 m
	Pista	2 x 3,5 m
	Acostamento	2 x 2,0 m
	Largura total	11,8 m

Quadro 2: Descrição das quatro OAEs (pontes) investigadas.
Fonte: Autores.

OAE	Material	
Ponte 1	Aço CA-50 (kg)	32.027,00
	Concreto 10 MPa (m ³)	5,71
	Concreto 20 MPa (m ³)	9,14
	Concreto 30 MPa (m ³)	38,13
	Concreto 35 MPa (m ³)	18,82
	Concreto 40 MPa (m ³)	207,36
Ponte 2	Aço CA-50 (kg)	43.241,00
	Concreto 10 MPa (m ³)	5,68
	Concreto 20 MPa (m ³)	32,48
	Concreto 30 MPa (m ³)	39,31
	Concreto 35 MPa (m ³)	18,74
	Concreto 40 MPa (m ³)	239,83
Ponte 3	Aço CA-50 (kg)	59.471,42
	Concreto 10 MPa (m ³)	5,53
	Concreto 20 MPa (m ³)	12,00
	Concreto 30 MPa (m ³)	47,66
	Concreto 35 MPa (m ³)	31,07
	Concreto 40 MPa (m ³)	473,89
Ponte 4	Aço CA-50 (kg)	118.024,00
	Concreto 10 MPa (m ³)	4,72
	Concreto 20 MPa (m ³)	77,31
	Concreto 30 MPa (m ³)	88,97
	Concreto 35 MPa (m ³)	145,93
	Concreto 40 MPa (m ³)	537,76

Quadro 03: Quantitativos de concreto e aço.
Fonte: Autores.

fck (MPa)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
10	258	833	1091	144
20	351	747	1097	149
30	426	676	1103	154
35	469	637	1106	156
40	495	613	1107	158

Quadro 04: Consumo de materiais por metro cúbico.
Fonte: Autores.

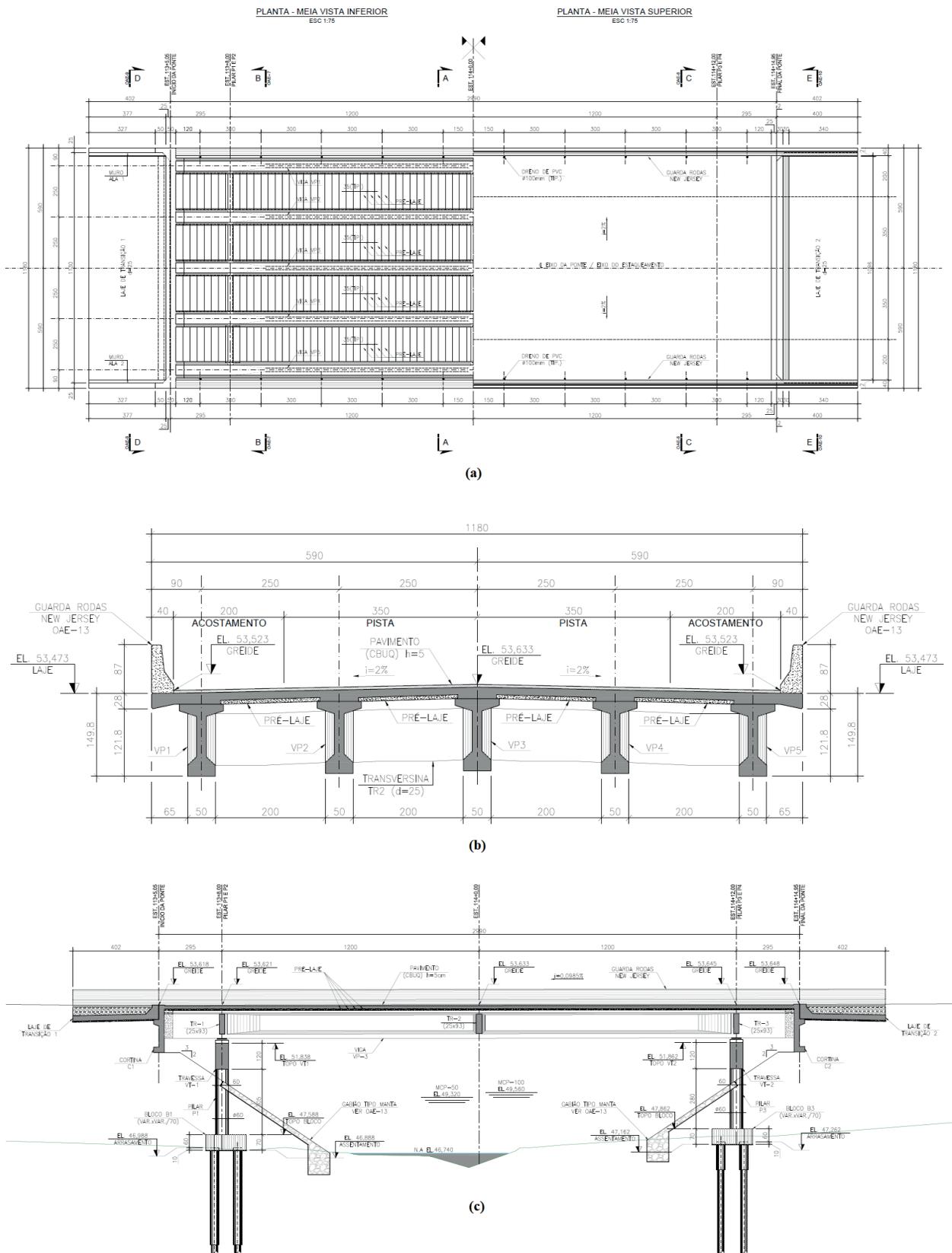


Figura 02: Planta baixa da Ponte 01 (a), corte da seção AA (b), e corte longitudinal (c).
Fonte: Acervo dos autores.

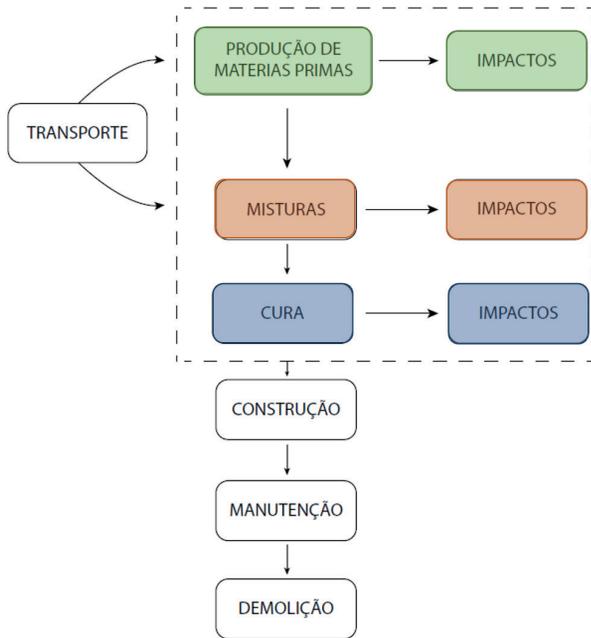


Figura 03: Fronteira do sistema.
Fonte: Autores.

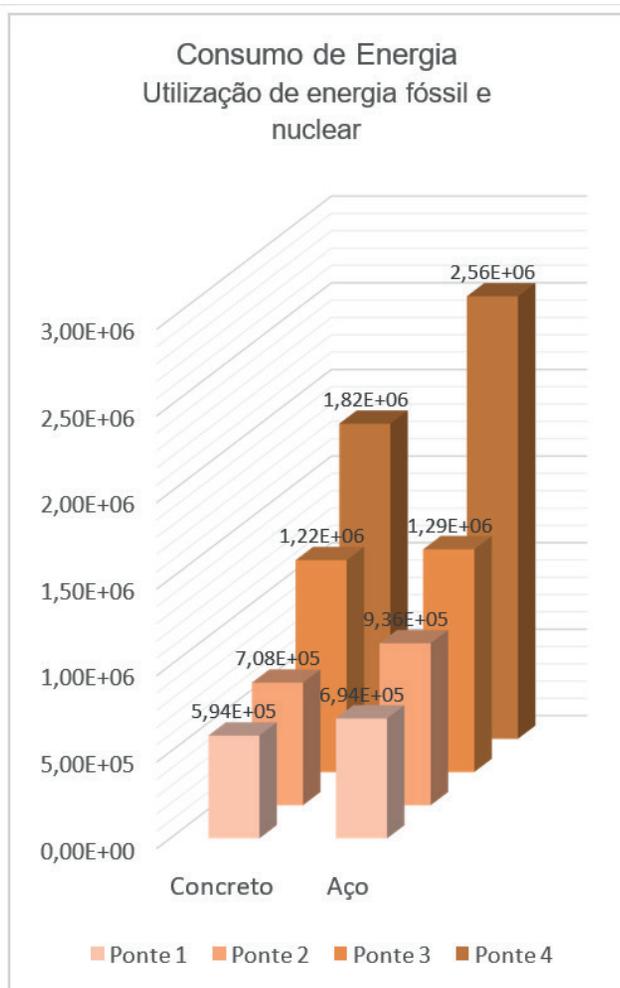


Figura 04: Resultados para a categoria consumo de energia.
Fonte: Autores.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Esta pesquisa exploratória-descritiva incluiu abordagens qualitativa e quantitativa. A primeira foi empregada na definição de indicadores observáveis e a segunda para destacar os valores mensurados por meio do programa computacional OpenLCA. A segunda englobou a análise dos resultados para compreender o nível do impacto da utilização do concreto armado nas pontes investigadas.

Foram selecionadas quatro obras de artes, neste caso, pontes projetadas para serem executadas com concreto armado. As pontes elegidas possuem diferentes vãos, mas geometria similar.

Para a estimativa dos impactos das OAEs os cálculos foram realizados com auxílio do programa OPENLCA (v. 1.11.0), e os dados de entrada foram selecionados da base de dados ecoinvent35_APOS_UP_20181210 fornecida pela Ecoinvent.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As pontes investigadas possuem geometria similar à da Ponte 1, conforme ilustra a Figura 2. As quatro pontes são de concreto armado com alguns elementos estruturais protendidos. A diferença básica entre elas é a extensão, a saber: Ponte 1 com 29,9 m; Ponte 2 com 36,55 m, Ponte 3 com 45,0 m e a Ponte 4 com 77,0 m. No Quadro 2 tem-se as características geométricas de cada uma das pontes.

Nos projetos das estruturas foram especificadas as resistências à compressão do concreto (fck), a saber, 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa (Quadro 3). O aço especificado em projeto e analisado foi o aço CA-50 - tensão de escoamento nominal de 500 MPa. O Quadro 3 também apresenta os quantitativos para os materiais, concreto e aço, levantados por ponte. Os traços dos concretos para essas estruturas foram produzidos com brita 2, diâmetro de 19 a 25 mm, conforme estabelecido no Quadro 4.

No que diz respeito à definição de fronteira do sistema deste estudo, foram consideradas para a análise do concreto as fases de produção de matéria-prima, mistura e cura, e para o aço foi considerada a fase de produção de matéria-prima, ver Figura 3.

Baseando-se na literatura consultada, selecionou-se dezoito fatores de impacto (ver Tabelas 1 e 2) que foram separados em quatro categorias de interesse: consumo de energia, aquecimento global (emissões), qualidade do ecossistema e saúde humana. Como o concreto é composto principalmente por quatro materiais, cimento, areia, brita e água, resolveu-se que na ACV também seriam

Categoria	Impacto	Unidade	Ponte 1					Ponte 2				
			Cimento	Areia	Brita	Água	Aço	Cimento	Areia	Brita	Água	Aço
Consumo de energia	Utilização de energia fóssil e nuclear	MJ deprived	4,77E+05	7,33E+04	4,36E+04	3,96E+02	6,94E+05	8,90E+04	5,25E+04	4,76E+02	9,36E+05	
	Aquecimento global, longo prazo	kg CO ₂ eq (long)	1,14E+05	6,40E+03	3,09E+03	2,90E+01	7,11E+04	7,77E+03	3,72E+03	3,48E+01	9,61E+04	
Aquecimento global (emissões)	Aquecimento global, curto prazo	kg CO ₂ eq (short)	1,16E+05	6,74E+03	3,26E+03	3,08E+01	7,50E+04	8,18E+03	3,93E+03	3,70E+01	1,01E+05	
	Acidificação aquática	kg SO ₂ eq	1,42E-09	2,92E-10	1,04E-10	8,94E-13	1,72E-09	3,54E-10	1,25E-10	1,07E-12	2,32E-09	
Qualidade do ecossistema	Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	3,75E-03	5,22E-04	2,56E-04	1,14E-05	3,96E-03	6,34E-04	3,08E-04	1,37E-05	5,34E-03	
	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	9,21E-04	1,79E-04	6,87E-05	5,61E-07	1,09E-03	2,18E-04	8,26E-05	6,74E-07	1,48E-03	
Qualidade do ecossistema	Ecotoxicidade aquática	CTUe	1,74E+08	7,63E+07	2,73E+07	2,92E+05	5,66E+08	9,27E+07	3,29E+07	3,51E+05	7,64E+08	
	Eutrofização aquática	kg PO ₄ -P-lim eq	1,70E-01	2,50E-02	9,11E-03	5,07E-05	1,56E-01	3,03E-02	1,10E-02	6,08E-05	2,10E-01	
Qualidade do ecossistema	Eutrofização marinha	kg N N-lim eq	2,97E+00	3,63E-01	2,08E-01	1,30E-03	2,79E+00	4,41E-01	2,50E-01	1,56E-03	3,77E+00	
	Ocupação do solo, biodiversidade	m ² arable lande eq.yr	3,93E+02	2,22E+02	1,02E+02	3,69E-01	8,54E+02	2,70E+02	1,23E+02	4,43E-01	1,15E+03	
Saúde humana	Transformação do solo, biodiversidade	m ² arable lande eq	6,08E+00	4,80E+00	8,01E+00	3,90E-03	8,34E+00	5,83E+00	9,64E+00	4,68E-03	1,13E+01	
	Utilização de recursos marinhos	kg deprived	3,13E+04	7,47E+01	2,00E+02	1,79E+00	2,55E+04	9,08E+01	2,41E+02	2,14E+00	3,45E+04	
Saúde humana	Escassez de água	m ³ world eq	1,04E+04	1,19E+04	4,95E+03	1,89E+03	3,09E+04	1,45E+04	5,95E+03	2,27E+03	4,18E+04	
	Toxicidade humana cancerígena	CTUh	1,41E-03	2,74E-04	3,36E-04	7,74E-06	3,54E-02	1,68E-03	4,05E-04	9,29E-06	4,77E-02	
Saúde humana	Toxicidade humana não cancerígena	CTUh	8,70E-03	1,03E-03	6,73E-04	1,15E-05	3,38E-02	1,24E-03	8,11E-04	1,38E-05	4,56E-02	
	Radiações ionizantes	Bq C-14 eq	1,71E+05	2,55E+04	3,74E+04	2,81E+02	2,72E+05	3,09E+04	4,50E+04	3,38E+02	3,67E+05	
Saúde humana	Formação de material particulado	kg PM2.5 eq	1,90E+01	5,47E+00	2,13E+00	1,86E-02	4,57E+01	6,65E+00	2,56E+00	2,23E-02	6,17E+01	
	Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC eq	2,11E+02	2,91E+01	1,41E+01	9,40E-02	3,02E+02	3,53E+01	1,70E+01	1,13E-01	4,08E+02	

Tabela 01: Fatores de impacto das Pontes 1 e 2, categorizados.
 Fonte: Autores.

Categoria	Impacto	Unidade	Ponte 3					Ponte 4				
			Cimento	Areia	Brita	Água	Aço	Cimento	Areia	Brita	Água	Aço
Consumo de energia	Utilização de energia fóssil e nuclear	MJ deprived	9,86E+05	1,48E+05	8,92E+04	8,10E+02	1,29E+06	2,24E+05	1,34E+05	1,21E+03	2,56E+06	
	Aquecimento global, longo prazo	kg CO ₂ : eq (long)	2,36E+05	1,30E+04	6,32E+03	5,93E+01	1,32E+05	1,96E+04	9,46E+03	8,87E+01	2,62E+05	
	Aquecimento global, curto prazo	kg CO ₂ : eq (short)	2,40E+05	1,37E+04	6,67E+03	6,30E+01	1,39E+05	2,06E+04	9,99E+03	9,43E+01	2,76E+05	
	Acidificação aquática	kg SO ₂ : eq	2,94E+09	5,91E+10	2,12E+10	1,83E-12	3,20E+09	8,93E-10	3,17E-10	2,74E-12	6,34E-09	
Qualidade do ecossistema	Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	7,75E-03	1,07E-03	5,28E-04	2,34E-05	7,35E-03	1,60E-03	7,76E-04	3,50E-05	1,46E-02	
	Acidificação terrestre	kg SO ₂ : eq	1,91E-03	3,65E-04	1,44E-04	1,15E-06	2,03E-03	5,05E-04	2,08E-04	1,72E-06	4,03E-03	
	Ecotoxicidade aquática	CTUe	3,59E+08	1,55E+08	5,58E+07	5,98E+05	1,05E+09	2,34E+08	8,36E+07	8,94E+05	2,09E+09	
	Eutrofização aquática	kg PO ₄ -P-lim eq	3,52E-01	5,06E-02	1,86E-02	1,04E-04	2,89E-01	7,64E-02	2,79E-02	1,55E-04	5,74E-01	
Saúde humana	Eutrofização marinha	kg N N-lim eq	6,14E+00	7,36E-01	4,24E-01	2,67E-03	5,18E+00	1,11E+00	6,36E-01	3,99E-03	1,03E+01	
	Ocupação do solo, biodiversidade	m ² arable lande eq.yr	8,13E+02	4,51E+02	2,09E+02	7,55E-01	1,59E+03	6,80E+02	3,12E+02	1,13E+00	3,15E+03	
	Transformação do solo, biodiversidade	m ² arable lande eq	1,26E+01	9,72E+00	1,64E+01	7,98E-03	1,55E+01	1,47E+01	2,45E+01	1,19E-02	3,07E+01	
	Utilização de recursos marinhos	kg deprived	6,48E+04	1,51E+02	4,09E+02	3,65E+00	4,74E+04	2,29E+02	6,12E+02	5,47E+00	9,42E+04	
Saúde humana	Escassez de água	m ³ world eq	2,14E+04	2,41E+04	1,01E+04	3,87E+03	5,74E+04	3,64E+04	1,51E+04	5,80E+03	1,14E+05	
	Toxicidade humana cancerígena	CTUh	2,91E-03	5,48E-04	6,85E-04	1,58E-05	6,57E-02	4,32E-03	1,02E-03	2,37E-05	1,30E-01	
	Toxicidade humana não cancerígena	CTUh	1,80E-02	2,08E-03	1,37E-03	2,35E-05	6,27E-02	2,66E-02	2,06E-03	3,52E-05	1,24E-01	
	Radiações ionizantes	Bq C-14 eq	3,54E+05	5,16E+04	7,65E+04	5,76E+02	5,05E+05	7,80E+04	1,15E+05	8,62E+02	1,00E+06	
Saúde humana	Formação de material particulado	kg PM2.5 eq	3,93E+01	1,11E+01	4,34E+00	3,80E-02	8,48E+01	1,67E+01	6,51E+00	5,69E-02	1,68E+02	
	Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC eq	4,37E+02	5,90E+01	2,89E+01	1,92E-01	5,61E+02	8,91E+01	4,33E+01	2,88E-01	1,11E+03	

Tabela 01: Fatores de impacto das Pontes 3 e 4-----, categorizados.
Fonte: Autores.

considerados os impactos de cada um separadamente. Os valores para cada fator de impacto foram comparados entre as quatro pontes, levando-se em consideração o volume de concreto determinado para cada uma.

Para a análise do aço foram utilizados os impactos totais referente a cada categoria, comparando-se os valores obtidos para as quatro pontes, em função do peso (kg) de aço determinado para cada uma.

A primeira categoria, consumo de energia, contém um impacto analisado, utilização de energia fóssil e nuclear, como pode ser observado no gráfico da Figura 4. Nessa categoria a contribuição do aço é predominante (53,9% - Ponte 1; 56,9% - Ponte 2; 51,3% - Ponte 3; 58,4% - Ponte 4) ao ser comparada à contribuição do concreto (46,1% - Ponte 1; 43,1% - Ponte 2; 48,7% - Ponte 3; 41,6% - Ponte 4).

Todos os valores, obtidos por meio do programa OpenLCA, dos dezoito fatores de impacto contemplados nesta pesquisa para cada uma das pontes avaliadas estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Ao se relacionar os fatores de impacto com o peso (kg) do aço utilizado na construção das pontes, verificou-se uma tendência linear com um fator de correlação igual a 1 (Figura 5). A mesma tendência foi observada para todos os outros fatores quando correlacionados ao peso (kg) de aço consumido na construção.

Tanto para o concreto quanto o cimento, na correlação determinada entre volume de concreto (m3) e fatores de impacto, também houve tendência linear. Nesse caso, os fatores de correlação foram 0,91 e 0,92 para concreto e cimento, respectivamente (Figura 6). Para os demais fatores de impacto observados foi identificada a mesma tendência linear quando correlacionados ao volume de concreto consumido na construção. Os fatores de correlação variaram entre 0,90 e 0,94.

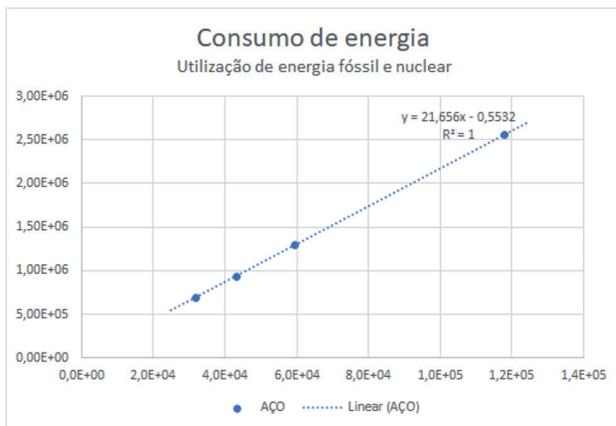


Figura 05: Correlação entre o peso (kg) de aço e o fator de impacto utilização de energia fóssil e nuclear.
Fonte: Autores.

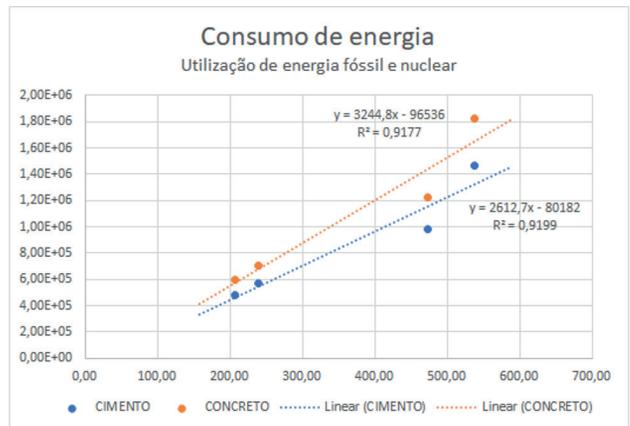


Figura 06: Correlação entre o peso (kg) de aço e o fator de impacto utilização de energia fóssil e nuclear.
Fonte: Autores.

Considerando o material areia isoladamente, os fatores de impacto mais significativos foram os categorizados em qualidade do ecossistema. Comparando-os à contribuição total avaliada (aço + concreto), os que se destacaram foram:

- escassez de água: 19,8% para Ponte 1; 18,8% para Ponte 2; 20,6% para Ponte 3; 17,9% para Ponte 4;
- transformação do solo, biodiversidade: 17,6% para Ponte 1; 17,2% para Ponte 2; 17,9% para Ponte 3; 16,6% para Ponte 4;
- ocupação do solo, biodiversidade: 14,1% para Ponte 1; 13,4% para Ponte 2; 14,7% para Ponte 3; 12,7% para Ponte 4.

Os maiores impactos ambientais causados pela utilização da brita foram os mesmos destacados para a areia, com as seguintes contribuições em relação ao total computado para cada ponte:

- transformação do solo, biodiversidade: 29,4% para Ponte 1; 28,4% para Ponte 2; 30,2% para Ponte 3; 27,7% para Ponte 4;
- escassez de água: 8,2% para Ponte 1; 7,8% para Ponte 2; 8,6% para Ponte 3; 7,5% para Ponte 4;
- ocupação do solo, biodiversidade: 6,5% para Ponte 1; 6,1% para Ponte 2; 6,8% para Ponte 3; 5,8% para Ponte 4.

Percebeu-se que nos resultados da AICV da categoria saúde humana, a contribuição do aço sobressaiu-se em todos os fatores de impacto. Sendo que para o fator toxicidade humana cancerígena, esse material é responsável por quase a totalidade das contribuições (94,6% para

Ponte 1; 95,2% para Ponte 2; 94,0% para Ponte 3; 95,5% para Ponte 4). Verificou-se, ainda, que a contribuição do concreto se aproxima bastante à do aço em radiações ionizantes e formação de oxidantes fotoquímicos.

Ao serem avaliados os resultados obtidos para a categoria aquecimento global (emissões), a contribuição do concreto se sobressai em todos os fatores observados, com uma pequena variação na maioria dos fatores. Contudo, para o fator aquecimento global (longo prazo), a sua contribuição (63,4% para Ponte 1; 60,5% para Ponte 2; 65,9% para Ponte 3; 59,1% para Ponte 4) é muito superior à contribuição do aço (36,5% para Ponte 1; 39,5% para Ponte 2; 34,1% para Ponte 3; 40,9% para Ponte 4). O processo de fabricação do cimento envolve queima de combustível fóssil, o que explica os altos valores apresentados nos resultados da AICV desse material para a categoria aquecimento global. A queima de carvão causa impactos ambientais significativos, uma vez que envolve emissão de material particulado e de gases poluentes, dentre os quais se destacam o dióxido de enxofre e os óxidos de nitrogênio. Além de prejudiciais à saúde humana, esses gases são os principais responsáveis pela formação da chamada chuva ácida, que provoca a acidificação do solo e da água e, conseqüentemente, alterações na biodiversidade.

A emissão CO₂ ocorre em um dos processos de produção do cimento conhecido como calcinação, que consiste na descarbonatação do calcário para transformá-lo no clínquer. Após extrair e moer o calcário (CaCO₃), esse é submetido a temperaturas de 1200 °C, gerando em óxido de cálcio (CaO) e gás carbônico (CO₂) (RIBEIRO, PINTO e STARLING, 2015).

Além disso, o processo de calcinação em uma fábrica de cimento corresponde a cerca de 69% das emissões de CO₂ enquanto os combustíveis utilizados para o transporte do material correspondem a 31%. A produção de matéria prima é uma das etapas que antecedem a produção do concreto e existem outras além do cimento como agregados e misturas, mas que não provocam tanto impacto quanto o primeiro. Por isso, o cimento é o material que mais preocupa em relação as emissões de CO₂ e mais contribui para o potencial de aquecimento global (SJUNNESSON, 2005).

Desde a extração do minério de ferro até a produção do aço na indústria, há contribuição significativa para a degradação do meio ambiente. Na primeira etapa há uma grande transformação do ecossistema, uma vez que áreas ocupadas para a instalação, transporte e extração do minério são extremamente extensas, proporcionando devastação do solo, da mata, degradação dos habitats dos

animais e transformação do relevo natural daquela área, podendo até influenciar as mudanças climáticas na região. Isso pode ser observado nos impactos da categoria qualidade do ecossistema:

- ecotoxicidade aquática: aço (67,1% para Ponte 1; 69,7% para Ponte 2; 64,8% para Ponte 3; 71,1% para Ponte 4) e cimento (20,6% para Ponte 1; 18,8% para Ponte 2; 22,2% para Ponte 3; 18,1% para Ponte 4);
- ocupação do solo, biodiversidade: aço (54,3% para Ponte 1; 57,3% para Ponte 2; 51,9% para Ponte 3; 58,9% para Ponte 4) e cimento (25,0% para Ponte 1; 23,2% para Ponte 2; 26,6% para Ponte 3; 22,5% para Ponte 4);
- escassez de água: aço (51,5% para Ponte 1; 54,4% para Ponte 2; 49,1% para Ponte 3; 56,1% para Ponte 4) e cimento (17,3% para Ponte 1; 16,0% para Ponte 2; 18,3% para Ponte 3; 15,6% para Ponte 4).

Comparando-se os impactos do aço com os do cimento, os fatores transformação do solo, biodiversidade e utilização de recursos minerais apresentaram uma faixa de valores próximos, para as quatro pontes investigadas.

5. CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados aqui apresentados, pode-se afirmar que tanto o concreto quanto o aço causam impactos ambientais significativos devido ao processo de produção de ambos.

Analisando-se o concreto, o seu impacto ambiental é maior na fase de produção do cimento. Durante a fabricação do cimento há a produção do clínquer, principal componente do cimento Portland, que, por sua vez, é o principal insumo para a fabricação do concreto. Em sua produção o cimento contribui com uma taxa de 5–8% do total das emissões globais de CO₂ (PILLAI et al., 2019).

Em dez dos dezoito fatores de impactos elegidos para a ACV desta pesquisa, o processo de produção do aço apresentou valores superiores aos determinados para o concreto. Seu impacto ambiental é destacado nas categorias saúde humana e consumo de energia. Na categoria qualidade do ecossistema ele apresentou índices maiores para quatro dos sete impactos considerados. Na categoria aquecimento global (emissões) o concreto é o principal contribuinte para a degradação ambiental. Assim, o aço se mostrou, nesta pesquisa, o material que mais causa impacto ambiental na construção de pontes.

A metodologia utilizada para a ACV de ambos os materiais, concreto e aço, utilizados em pontes de concreto armado, demonstrou-se adequada e eficaz para avaliação de impactos ambientais das construções. Pode-se citar como desafio a utilização da base de dados da Ecoinvent que, por ser uma base estrangeira, há necessidade de busca cuidadosa pelos materiais equivalentes aos especificados no projeto.

No Brasil, existe o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), que leva em conta as características dos materiais encontrados e produzidos em território nacional. Desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict), é a maior contribuição para a ACV no Brasil, porém, essa base de dados é limitada, haja vista a pequena quantidade de fluxos fornecida na base. Por isso, os bancos de dados europeus, que são mais completos e ricos em informações têm sido mais utilizados.

Quanto à diferença na extensão das pontes, observou-se uma tendência linear no crescimento dos valores dos impactos, ou seja, quanto maior a extensão, maior o peso (kg) e o volume (m³) do concreto consumidos, e por consequência, o impacto ambiental, como já se esperava.

Como proposta para estudos futuros, sugere-se a avaliação completa para as OAE, ou seja, considerando-as do berço ao túmulo, uma vez que, no Brasil, essas obras são comumente projetadas para uma vida útil de cem anos. Além disso, destaca-se, também, a necessidade de avaliação considerando os aspectos econômicos, como bem sugerem os autores Marinkovic, Carevic e Dragaš (2021).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: **Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a. 30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: **Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009b. 52 p.

BARE, J.C. et al. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. **Int. J. LCA** v. 5, n. 319, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02978665>

BRASIL. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 5. ed. Brasília:

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2020. 107 p. ISBN 978-85-88063-91-4

BULLE, C. et al. IMPACT world+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **Springer Science and Business Media LLC**, v. 24, n. 9, p. 1653-1674, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>

CHEN, Shilun; DUFFIELD, Colin; MIRAMINI, Saeed; RAJA, Babar Nasim Khan; ZHANG, Lihai. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. **Engineering Structures**, v. 237, p. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112143>

DU, G. **Life cycle assessment of bridges, model development and case studies**. 2015. 36 p. Tese (Tese de Doutorado) — Department of Technology and Society, Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Stockholm, Sweden, 2015

GREENDELTA. OpenLCA. 2022. Disponível em: <https://www.openlca.org/open-source>

ISLAM, H.; JOLLANDS, M.; SETUNGE, S. Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - a review. **Elsevier BV**, v. 42, p. 129-140, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.006>

JORDAN, M. et al. Global ABC Roadmap for Buildings and Construction. **Paris and Nairobi: International Energy Agency and United Nations Environment Programme**, 2020. Disponível em: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/GlobalABC_Roadmap_for_Buildings_and_Construction_2020-2050_3.pdf. Acesso em: 5 dez. 2022.

MARINKOVIC, Snežana; CAREVIC, Vedran; DRAGAŠ, Jelena. The role of service life in Life Cycle Assessment of concrete structures. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125610>

MATTHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C. T.; MATTHEWS, D. H. **Life cycle assessment: Quantitative approaches for decisions that matter**, 2015. Disponível em: <http://lcatextbook.com>. Acesso em: 5 dez. 2022.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILHENA, A. **Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Aplicações**. Campinas: CETEA/CEMPRE, 92p. 2002.

PILLAI, Radhakrishna G.; GETTU, Ravindra; SANTHANAM, Manu; RENGARAJU, SriPriya; DHANDAPANI, Yuvaraj; RATHNARAJAN, Sundar; BASAVARAJ, Anusha S. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 118, p. 111-119, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.019>oadFile&recordId=4468239&fileId=4469176. Acesso em: 3 jan. 2023.

PRADHAN, Subhasis; POH, Anthony Chang Boon; QIAN, Shunzhi. Impact of service life and system boundaries on life cycle assessment of sustainable concrete mixes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 342, p. 1-11, 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130847>.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4ª ed. Belo Horizonte: [S.l.: s.n.], 2015. 33-53 p.

SJUNNESSON, J. **Life Cycle Assessment of Concrete**. 2005. 61 p. Tese (Thesis) — Department of Technology and Society, Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Gerdagatan, 2005.

UNITED NATIONS ORGANIZATION. Launched: 2020 **Global Status Report for Buildings and Construction**. 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 3 jan. 2023.

VERONES, Francesca et al. LCIA framework and cross-cutting issues guidance within the UNEPSETAC Life Cycle Initiative. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 957-967, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.206>

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ecoinvent pela concessão da licença para acesso às bases de dados internacionais.

AUTORES

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2865-8782>

GLÁCIA NOLASCO DE ALMEIDA MELLO, Dra. | Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais| Engenharia Civil | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: R. Dom José Gaspar, 500 Prédio 3 - Sala 102, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Mg - Cep 30535-901 | E-mail: gnamello@pucminas.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5326-2536>

LUCAS LOPES DE CARVALHO PENA, Eng. Civil. | Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais| Engenharia Civil | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: R. Dom José Gaspar, 500 Prédio 3 - Sala 102, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Mg - Cep 30535-901 | E-mail: llcpena@sga.pucminas.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2374-4451>

LEONARDO MINDÉLLO MUSCHIONI, Eng. Civil. | Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais| Engenharia Civil | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: R. Dom José Gaspar, 500 Prédio 3 - Sala 102, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Mg - Cep 30535-901 | E-mail: leonardo.muschioni@sga.pucminas.br

COMO CITAR ESTE ARTIGO

MELLO, Gláucia Nolasco de Almeida; PENA, Lucas Lopes de Carvalho; MUSCHIONI, Leonardo Mindéll. **Avaliação do Impacto Ambiental Causado por Concreto Armado Utilizado em Pontes**. MIX Sustentável, v. 9, n. 3, p. 17-32, 2023. ISSN 2447-3073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: [_/_/_](https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n3.17-32). doi: <<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n3.17-32>>.

SUBMETIDO EM: 18/01/2023

ACEITO EM: 02/04/2023

PUBLICADO EM: 30/07/2023

EDITORES RESPONSÁVEIS: Flávio Gabriel da Silva Craveiro e Lisiane Ilha Librelotto.

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

GNAM: Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita, Escrita - revisão e edição

LLCP: Curadoria de dados, Análise formal, Investigação,
Validação, Visualização, Escrita, Escrita - revisão e edição
LMM: Curadoria de dados, Análise formal, Investigação,
Validação, Escrita

Declaração de conflito: nada foi declarado.