

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Maurício Ruschel**

**ESTUDO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS INCORPORADOS A UMA  
PASSARELA PRODUZIDA EM CONCRETO TÊXTIL COMPARADOS  
À EQUIVALENTE EM CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DA  
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Porto Alegre  
Novembro de 2020

**MAURÍCIO RUSCHEL**

**ESTUDO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS INCORPORADOS A UMA PASSARELA  
PRODUZIDA EM CONCRETO TÊXTIL COMPARADOS À EQUIVALENTE EM  
CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de  
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadoras:**

**Ana Carolina Badalotti Passuello**

**Vanessa Fátima Pasa Dutra**

Porto Alegre

Novembro de 2020

**MAURÍCIO RUSCHEL**

**ESTUDO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS INCORPORADOS A UMA PASSARELA  
PRODUZIDA EM CONCRETO TÊXTIL COMPARADOS À EQUIVALENTE EM  
CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelas Professoras Orientadoras e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2020

PhD. Ana Carolina Badalotti Passuello  
PhD pela *Universitat Rovira i Virgili / ES*  
Orientadora

Dra. Vanessa Fátima Pasa Dutra  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**PhD. Ana Carolina Badalotti Passuello**  
PhD pela *Universitat Rovira i Virgili / ES*

**Dra. Vanessa Fátima Pasa Dutra**  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Dra. Luciani Somensi Lorenzi**  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Ma. Janaine Fernanda Gaelzer Timm**  
Mestra pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, fonte inesgotável de apoio, compreensão e amor, que possibilitou que eu alcançasse as minhas conquistas e que eu me tornasse quem eu sou hoje, estando ao meu lado em todos os momentos. Meus pais, Euzébio e Denise, obrigado por me guiarem nos caminhos da vida, por não medirem esforços para eu buscar a realização pessoal e por serem meus exemplos de amizade, respeito, honestidade e carinho, valores essenciais para a construção de um indivíduo. Meu irmão, Artur, agradeço por partilhar comigo do crescimento, dos aprendizados e da fraternidade. Minha cunhada, Bruna, grato pelos conselhos acadêmicos e pela força. Meus avós, tias, tios, primas, primos e demais familiares, obrigado pela generosidade e por todos os desejos de sucesso. A todos vocês meu amor incondicional.

Às Professoras Ana Carolina Badalotti Passuello e Vanessa Fátima Pasa Dutra, profissionais e pessoas extraordinárias, minha gratidão pela dedicada orientação, pelos incentivos, pelas contribuições e por toda a atenção para que eu desenvolvesse este trabalho da melhor maneira e concluísse essa etapa importante, principalmente no período desafiador que vivemos.

A todos os demais professores e professoras que contribuíram para a minha formação e me trouxeram inspiração, transmitindo conhecimentos, orientando nas diversas atividades acadêmicas e exercendo seus trabalhos de maneira exemplar. Agradecimento especial à Professora Ângela Gaio Graeff e aos outros professores, doutorandos, pesquisadores e colegas de Iniciação Científica do LEME.

Por fim, a todas as pessoas importantes para mim: queridos amigos e amigas, especialmente da UFRGS – meus presentes nessa trajetória de sete anos –, obrigado por tudo que me transmitiram, pelos momentos vividos juntos, pelos laços e confiança que construímos e manteremos pelas nossas vidas. Cada um tem um espaço muito especial em mim, admiro e amo todos vocês.

## RESUMO

A busca por materiais construtivos mais sustentáveis se faz necessária frente às crescentes transformações ambientais vividas atualmente. Sabe-se que a construção civil consome cerca de 30% da energia global e 60% das matérias primas extraídas. O concreto têxtil é um material compósito inovador formado por matriz de granulometria fina e reforço não metálico, composto de fibras têxteis, que possibilita a execução de estruturas mais esbeltas e leves, com economias de até 80% do volume de concreto utilizado. Apesar de seu grande potencial de redução dos impactos ambientais, como material alternativo ao concreto armado, ainda há poucos estudos voltados para o seu desempenho ambiental, principalmente no Brasil. Visto isso, este trabalho busca comparar os impactos ambientais incorporados a uma passarela projetada em concreto têxtil aos de sua equivalente em concreto armado, utilizando a Avaliação de Ciclo de Vida como ferramenta; enfocando a produção das estruturas (abordagem berço ao portão), em contexto local, são avaliadas sete categorias de impacto, com o uso do *software openLCA*. Os resultados sugerem amplas vantagens para o concreto têxtil, com impactos em média três vezes menores que o concreto armado em seis das sete categorias analisadas, e o concreto apresenta as contribuições predominantes em ambas as soluções.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Concreto Têxtil. Impacto Ambiental. Material Inovador. Passarela.

## **ABSTRACT**

The search of more sustainable constructive materials is necessary considering the current growing environmental changes. It is known that the construction industry consumes about 30% of global energy and 60% of extracted raw materials. Textile reinforced concrete is an innovative composite material made of a fine-grained matrix and non-metallic reinforcement, composed of textile fibers, that allows the execution of slender and lightweight structures, with savings of up to 80% of concrete volume. In spite of its great potential of reducing environmental impacts, as an alternative material for reinforced concrete, there are still few studies concerning its environmental performance, especially in Brazil. Therefore, this article aims to compare the environmental impacts associated to a designed pedestrian bridge made of textile reinforced concrete with its equivalent made of reinforced concrete, using Life Cycle Assessment; focusing in the production phase of the structures (cradle-to-gate perspective), in a local context, seven impact categories are assessed using openLCA software. The results suggest large advantages for textile reinforced concrete, with impacts on average 3 times lower than reinforced concrete in six of seven assessed categories, and concrete presents predominant contributions to both solutions.

**Keywords:** Life Cycle Assessment. Textile Reinforced Concrete. Environmental Impact. Innovative Material. Pedestrian Bridge.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Concreto têxtil.....	2
Figura 2 – Reforço têxtil .....	2
Figura 3 – Passarela de Oschatz .....	4
Figura 4 – Passarela de Albstadt.....	4
Figura 5 – Etapas do ciclo de vida de um produto .....	5
Figura 6 – Seção transversal da passarela de concreto armado .....	8
Figura 7 – Seção transversal da passarela de concreto têxtil .....	9
Figura 8 – Sistema de produto das passarelas .....	11
Figura 9 – Comparativo do impacto ambiental potencial das passarelas de CA e CT. ....	15

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações e dimensões da passarela de concreto armado .....	8
Tabela 2 – Quantidade de armadura da passarela de concreto armado .....	8
Tabela 3 – Informações e dimensões da passarela de concreto têxtil.....	9
Tabela 4 – Traço M9-15 do concreto utilizado para a passarela de concreto têxtil .....	9
Tabela 5 – Propriedades e quantidades do reforço de fibra de vidro álcali-resistente.....	10
Tabela 6 – Quantitativos dos materiais das passarelas de concreto armado e concreto têxtil .	11
Tabela 7 – Adaptação do <i>dataset</i> de concreto para o concreto têxtil .....	12
Tabela 8 – Conjunto de dados selecionados para a passarela de concreto armado .....	13
Tabela 9 – Conjunto de dados selecionados para a passarela de concreto têxtil.....	13
Tabela 10 – Resultados das categorias de impacto de ACV para as passarelas de CA e CT ..	14



## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ADPE – *Abiotic Depletion Potential for Non Fossil Resources*

ADPF – *Abiotic Depletion Potential for Fossil Resources*

AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

AP – *Acidification Potential of Soil and Water*

AR – Álcali-Resistente

CA – Concreto Armado

CED – *Cumulative Energy Demand*

CEN – *European Committee for Standardization*

CML – *Institute of Environmental Sciences (Centrum voor Milieuwetenschappen)*

CT – Concreto Têxtil

DFG – *Deutsche Forschungsgemeinschaft*

EP – *Eutrophication Potential*

EPD – *Environmental Product Declaration*

GWP – *Global Warming Potential*

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

ISO – *International Organization for Standardization*

ODP – *Depletion Potential of the Stratospheric Ozone Layer*

POCP – *Formation Potential of Tropospheric Ozone*

RAICV – Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

RoW – *Rest of World*

TRC – *Textile Reinforced Concrete*

UF – Unidade Funcional

UR – Unidade de Referência

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Concreto Têxtil</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>Avaliação do Ciclo de Vida</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Avaliação do Ciclo de Vida do Concreto Têxtil</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>7</b>
<b>3.1</b>	<b>Estudo de Caso</b> .....	<b>7</b>
3.1.1	Características da Passarela de Concreto Armado .....	8
3.1.2	Características da Passarela de Concreto Têxtil .....	8
<b>3.2</b>	<b>Objetivo e Escopo da ACV</b> .....	<b>10</b>
3.2.1	Unidade Funcional.....	10
3.2.2	Sistema de Produto e Fronteira do Sistema.....	10
<b>3.3</b>	<b>Inventário do Ciclo de Vida (ICV)</b> .....	<b>11</b>
3.3.1	Quantitativos dos Materiais.....	11
3.3.2	Inventário e Conjunto de Dados .....	12
<b>3.4</b>	<b>Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)</b> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>16</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>17</b>

# **ESTUDO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS INCORPORADOS A UMA PASSARELA PRODUZIDA EM CONCRETO TÊXTIL COMPARADOS À EQUIVALENTE EM CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

## **STUDY OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS ASSOCIATED WITH A PEDESTRIAN BRIDGE MADE OF TEXTILE REINFORCED CONCRETE COMPARED TO ITS EQUIVALENT OF REINFORCED CONCRETE THROUGH LIFE CYCLE ASSESSMENT**

### **RESUMO**

A busca por materiais construtivos mais sustentáveis se faz necessária frente às crescentes transformações ambientais vividas atualmente. Sabe-se que a construção civil consome cerca de 30% da energia global e 60% das matérias primas extraídas. O concreto têxtil é um material compósito inovador formado por matriz de granulometria fina e reforço não metálico, composto de fibras têxteis, que possibilita a execução de estruturas mais esbeltas e leves, com economias de até 80% do volume de concreto utilizado. Apesar de seu grande potencial de redução dos impactos ambientais, como material alternativo ao concreto armado, ainda há poucos estudos voltados para o seu desempenho ambiental, principalmente no Brasil. Visto isso, este trabalho busca comparar os impactos ambientais incorporados a uma passarela projetada em concreto têxtil aos de sua equivalente em concreto armado, utilizando a Avaliação de Ciclo de Vida como ferramenta; enfocando a produção das estruturas (abordagem berço ao portão), em contexto local, são avaliadas sete categorias de impacto, com o uso do software openLCA. Os resultados sugerem amplas vantagens para o concreto têxtil, com impactos em média três vezes menores que o concreto armado em seis das sete categorias analisadas, e o concreto apresenta as contribuições predominantes em ambas as soluções.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida. Concreto Têxtil. Impacto Ambiental. Material Inovador. Passarela.

### **ABSTRACT**

The search of more sustainable constructive materials is necessary considering the current growing environmental changes. It is known that the construction industry consumes about 30% of global energy and 60% of extracted raw materials. Textile reinforced concrete is an innovative composite material made of a fine-grained matrix and non-metallic reinforcement, composed of textile fibers, that allows the execution of slender and lightweight structures, with savings of up to 80% of concrete volume. In spite of its great potential of reducing environmental impacts, as an alternative material for reinforced concrete, there are still few studies concerning its environmental performance, especially in Brazil. Therefore, this article aims to compare the environmental impacts associated to a designed pedestrian bridge made of textile reinforced concrete with its equivalent made of reinforced concrete, using Life Cycle Assessment; focusing in the production phase of the structures (cradle-to-gate perspective), in a local context, seven impact categories are assessed using openLCA software. The results suggest large advantages for textile reinforced concrete, with impacts on average 3 times lower than reinforced concrete in six of seven assessed categories, and concrete presents predominant contributions to both solutions.

**Keywords:** Life Cycle Assessment. Textile Reinforced Concrete. Environmental Impact. Innovative Material. Pedestrian Bridge.

# 1 INTRODUÇÃO

Os impactos das atividades humanas são incontestáveis, uma vez que nas últimas décadas elas vêm transformando os sistemas naturais do planeta, excedendo suas capacidades e desequilibrando seus mecanismos de regulação. As consequências já são percebidas, como as crescentes mudanças climáticas, e podem inclusive ser irreversíveis para a humanidade e o meio ambiente (UN ENVIRONMENT, 2019).

O setor da construção tem grande participação nesses impactos. Aproximadamente 32% do total de energia global consumida, 19% das emissões de CO<sub>2</sub> e 60% das extrações de matérias primas são referentes à construção civil (BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN, 2011; IPCC, 2014). O concreto armado (CA) é amplamente empregado no meio urbano e nas obras civis, ocupando a posição de segundo material mais consumido no mundo (depois da água), e o cimento, um de seus principais constituintes, tem um processo de produção altamente emissivo de gases de efeito estufa (WBCSD, 2009). Ao mesmo tempo, entende-se que o setor apresenta grande potencial para reduzir as emissões que produz e os impactos que provoca (IPCC, 2014).

Nesse contexto, novos materiais de construção com melhor desempenho ambiental são amplamente estudados e desenvolvidos. Entre eles o concreto têxtil (CT), um material compósito inovador constituído por matriz de granulometria fina e reforço não metálico, o que torna desnecessária a adoção de uma espessa camada de cobrimento para combater a corrosão (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006; HEGGER; VOSS, 2008). Esse fato permite a execução de estruturas mais esbeltas, leves, de alta durabilidade e resistência, viabilizando a redução de até 80% do volume de concreto utilizado (KULAS, 2015; TOMOSCHEIT *et al.*, 2011). Assim, suas características e utilização podem contribuir para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e atribuem ao CT um grande potencial de redução dos impactos ambientais, pronunciadamente superior ao CA.

No cenário mundial, os estudos do CT foram fomentados principalmente na Alemanha, através de projetos de pesquisa iniciados há 20 anos, que produziram uma base sólida para o conhecimento de suas propriedades mecânicas (DENARDI, 2016). Portal *et al.* (2015) pontuam a existência de poucas pesquisas acerca do desempenho ambiental do material e ressaltam a importância de haver transparência nos métodos utilizados, sugerindo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para tal fim. No Brasil, o número de estudos é limitado, com destaque para a ampla revisão bibliográfica realizada por Dutra *et al.* (2017) e o dimensionamento de uma passarela de pedestres em CA e em CT desenvolvido por Morassutti e Dutra (2017).

Morassutti e Dutra (2017) comparam as abordagens de cálculo das normas brasileiras para o CA e dos modelos de engenharia recomendados pela literatura do CT. Os dois projetos de passarela são equivalentes, porém não são idênticos. As diferenças entre suas geometrias e dimensões levam a resultados que evidenciam a ampla economia de concreto possibilitada para o novo material e possivelmente indicam, também, grandes diferenças entre seus impactos ambientais. A ACV no ambiente construído serve como um bom método para a quantificação dos impactos e emissões de edificações, obras civis ou materiais construtivos (CEN, 2014). A comparação entre produtos é possível somente quando são considerados equivalentes em determinada função, o que auxilia no processo de tomada de decisão em projetos (ABNT, 2009a).

Assim, o objetivo do presente trabalho é investigar os impactos ambientais incorporados à passarela em CT e à sua equivalente em CA, a fim de confirmar, para o

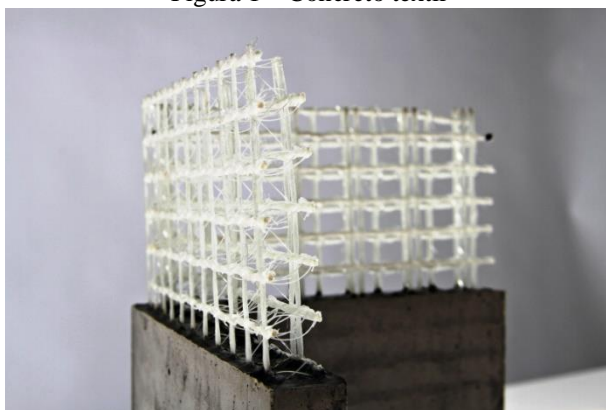
cenário nacional, as tendências conhecidas para o compósito, atestando-o como um possível substituto do CA mais favorável ambientalmente. A técnica escolhida para realizar a análise é a ACV, visando ampliar a gama de conhecimentos a respeito do CT, trazer o assunto para o âmbito nacional e suscitar a discussão em torno da crescente necessidade de buscar soluções para o desenvolvimento sustentável da humanidade e da construção civil.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Concreto Têxtil

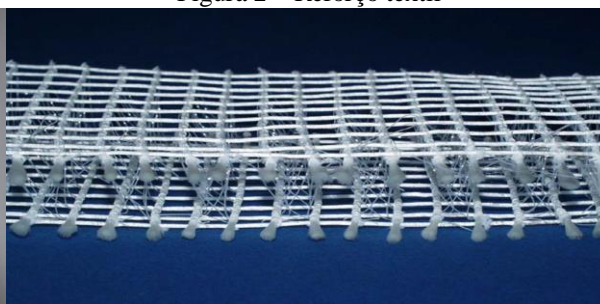
O concreto têxtil (CT) (Figura 1), do inglês *Textile Reinforced Concrete (TRC)*, um material compósito de concreto de granulometria fina reforçado com tramas de fibras multiaxiais (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006) (Figura 2), surge como uma alternativa ao concreto armado (CA). Seu uso permite a execução de elementos estruturais de alta resistência e durabilidade, bastante esbeltos e leves, resistentes à corrosão e com formas geométricas arrojadas (HEGGER; VOSS, 2008; REMPEL; KULAS; HEGGER, 2015).

Figura 1 – Concreto têxtil



(fonte: V. Fraas Solutions in Textile GmbH)

Figura 2 – Reforço têxtil



(fonte: Gries; Offerman; Peled, 2006)

O reforço do CT (denominado como *têxtil*) pode ser composto, entre outros, por fibras de carbono, de aramida, de basalto e de vidro álcali-resistentes (AR) (RAUPACH *et al.*, 2006), as quais apresentam boa resistência ao meio alcalino em que se encontram e têm propriedades adequadas, como alta tenacidade e módulo de elasticidade bastante superior ao da matriz de concreto, garantindo a efetividade do reforço (GRIES *et al.*, 2006). A matriz, por sua vez, é constituída por cimento, agregados finos, aditivos, adições e água (com baixa relação água/cimento) (PORTAL; THRANE; LUNDGREN, 2017). O tamanho máximo dos agregados está relacionado com a espessura do elemento a ser executado e com a abertura da malha têxtil, sendo, em geral, menor que 2 mm, o que pode classificá-la como uma argamassa ou um concreto de agregados finos. Essa dimensão de agregado pode, entretanto, intensificar a retração da matriz, sendo aceitável um pequeno aumento para 4-6 mm (PORTAL, 2015).

Aliada ao tipo de têxtil, a matriz utilizada deve apresentar características que resultem na compatibilidade química e boa interação entre os materiais. Obter o traço ideal de concreto é uma tarefa complexa, como aponta Brameshuber *et al.* (2006), na medida em que diversos requisitos devem ser atendidos: a consistência da matriz impacta na sua penetração no têxtil – o que tem grande influência na aderência entre os materiais e na transferência de carga para as fibras – e na trabalhabilidade, aspecto relevante para o processo de produção adotado; as propriedades mecânicas são determinantes para a capacidade de carga do elemento de CT, assim como para a obtenção de altas resistências iniciais e a possibilidade de rápida desforma (características almejadas para a produção de pré-moldados). Dessa forma, diferentes tipos de projetos demandam matrizes específicas, portanto deve haver uma composição adequada de

todos esses requisitos, visando à estabilidade e durabilidade do material, mas também aos interesses econômicos (HEGGER *et al.*, 2010).

Na produção do têxtil, existem centenas a milhares de fibras elementares, ou filamentos, que agrupados formam um fio (ou feixe) (GRIES *et al.*, 2006). Cada filamento possui diâmetro de 5 a 30  $\mu\text{m}$ . Os fios são, então, processados em máquinas têxteis para formar as estruturas a serem utilizadas como reforço (tais como malhas bi ou tridimensionais) (PORTAL, 2015). O agrupamento faz com que surjam espaços vazios microscópicos entre as fibras, dificultando a penetração efetiva da matriz de concreto nos filamentos mais internos (KULAS, 2015). Dessa forma, a tensão é transmitida somente aos filamentos mais externos, resultando em uma baixa capacidade de carga (RAUPACH *et al.*, 2006). Reinhardt *et al.* (2006) descrevem a seção transversal dos fios como não homogênea, uma vez que há os filamentos externos (os quais estão em contato direto com a matriz e apresentam boa ligação com esta) e os internos (que estão apenas em contato com outros filamentos e são tensionados indiretamente, podendo deslizar com mais facilidade).

A fim de promover a ligação interna entre os filamentos e tornar a dissipação de carga mais efetiva nos fios, é necessário que eles sejam impregnados com materiais poliméricos, como resina epóxi ou estireno butadieno (RAUPACH *et al.*, 2006; REMPEL; KULAS; HEGGER, 2015). Ao serem impregnados, todos os filamentos de um fio ficam ancorados na pasta de cimento, não ocorrendo o deslizamento dos mais internos (REINHARDT *et al.*, 2006). Kulas (2015) ressalta a importância da utilização da resina epóxi para a produção de reforços estáveis, permitindo a obtenção de têxteis moldados em ângulos, perfis tipo U ou curvos de forma livre.

Segundo Kulas (2015), a grande vantagem do CT em comparação ao CA é a natureza não corrosiva de seu reforço. Enquanto o aço pode sofrer corrosão metálica pela ação de agentes externos que penetram nos poros da matriz, o têxtil resiste a esses ataques. Isso é o que permite a redução da camada protetiva de concreto (cobrimento) ao reforço e resulta, conseqüentemente, em menor consumo desse material. É possível produzir elementos com espessuras até 80% menores que os de CA, impactando também nos custos de transporte de pré-moldados de forma significativa (KULAS, 2015).

Aproveitando tais vantagens, o CT já teve diversas aplicações até o momento. Com elementos estruturais mais esbeltos e leves, além de superfícies com acabamento de boa qualidade, esse material se mostrou satisfatório em diferentes situações, conforme elencado por Hegger *et al.* (2006) e Kulas (2015): painéis de revestimento de fachadas, paredes e elementos sanduíche (duas camadas de CT externas envolvendo uma camada de isolamento interna), componentes de armazenamento (tanques, silos), marquises, passarelas e pontes, além de reforços estruturais de elementos já existentes.

As pontes executadas na Alemanha são destinadas a pedestres, bicicletas e até carros, mais recentemente. A primeira passarela foi feita na cidade de Oschatz em 2006 (Figura 3), projetada pelo Instituto de Estruturas de Concreto da Universidade de Dresden, com um comprimento de vão de 8,60 m, seção transversal em formato de U e espessura de apenas 3 cm, contando também com armadura de aço protendida (HEGGER *et al.*, 2006). A passarela mais extensa foi construída em Albstadt em 2010 (Figura 4), com 100 m de comprimento e seção transversal com vigas em formato de T, sendo, de forma semelhante à anterior, uma solução mista, nesse caso de CA e CT (HEGGER *et al.*, 2010). Novas pontes foram executadas em território alemão nos últimos anos, algumas inteiramente em CT reforçado com fibra de carbono (em 2015, com 15 m de comprimento), duas destinadas à passagem de carros (em 2016 e 2017, com 6 m e 10 m) e diversas outras em 2019 (REMPEL *et al.*, 2017; SOLIDIAN, 2019).

Figura 3 – Passarela de Oschatz

(fonte: Hegger *et al.*, 2006)

Figura 4 – Passarela de Albstadt



(fonte: solidian)

Vários aspectos do CT foram explorados extensivamente nas aplicações citadas, como o seu comportamento estrutural, sua produção, os projetos, atestando-o como um material de alto desempenho ao utilizar concretos e reforços têxteis de alta resistência à compressão e à tração, respectivamente (REMPEL; KULAS; HEGGER, 2015). Maior concentração de pesquisas dos últimos 20 anos é identificada na Alemanha, as quais foram conduzidas por dois centros colaborativos de pesquisa fundados pela instituição alemã de fomento à pesquisa *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (DFG): o CRC 528, liderado pela *TU Dresden*, e o CRC 532, liderado pela *RWTH Aachen University* (DENARDI, 2016).

No Brasil, as pesquisas do CT são incipientes. Denardi (2016) realizou uma vasta revisão da bibliografia existente do material, trazendo uma contextualização do que já é conhecido e consolidado no cenário internacional. Nora (2018) desenvolveu uma análise experimental do comportamento mecânico de vigas reforçadas com CT, comparando o aumento da capacidade de carga de um reforço têxtil produzido no Brasil com um suíço. Giese (2019) também analisou o comportamento mecânico de vigas reforçadas com CT de fibra de vidro AR, verificando a influência de alguns parâmetros de execução: idade de ruptura, número de camadas e fissuração prévia. Ortolan (2019) investigou as características dos têxteis de vidro AR nacionais para uso em painéis pré-fabricados. Morassutti (2016) efetuou o dimensionamento de uma passarela de pedestres em CA e em CT, comparando as abordagens da norma brasileira de projeto de estruturas de concreto armado (NBR 6118) e os modelos de engenharia recomendados pela literatura do CT; o resultado é uma espessura de tabuleiro na ordem de 1/3 para a passarela de CT em relação à de CA e a redução de 77,5% do peso da estrutura, indicando possíveis vantagens nos custos de produção, de transporte e ganhos ambientais.

Tanto no cenário nacional, como no internacional, ainda são encontrados poucos estudos voltados para o perfil ambiental desse material. Portal *et al.* (2015) ressaltam a importância de métodos de avaliação mais transparentes e padronizados para materiais inovadores, como é o caso do CT, e indicam a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como uma técnica adequada para esse fim.

## 2.2 Avaliação do Ciclo de Vida

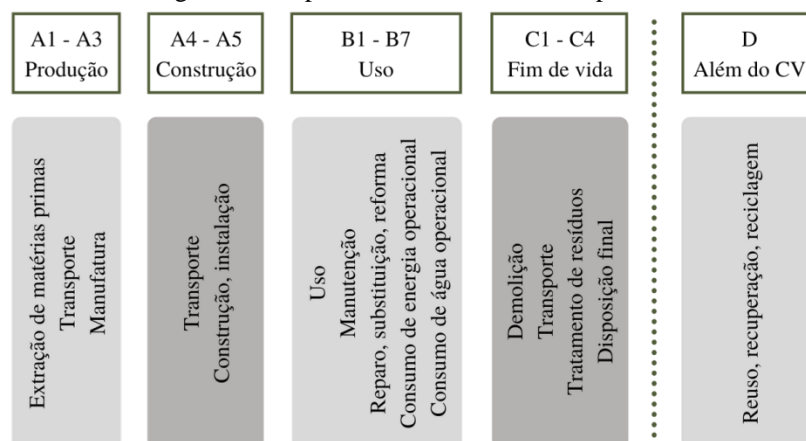
A Avaliação de Ciclo de Vida é uma técnica que objetiva compreender e analisar os possíveis impactos ambientais associados a determinado produto (ABNT, 2009a). Os recursos utilizados e as emissões ao meio ambiente resultantes, compreendendo diversas fases do seu ciclo de vida (desde a aquisição de matérias primas, produção, uso, manutenção até o descarte), são reunidos e servem de base para o estudo de avaliação do perfil ambiental desse produto, auxiliando na tomada de decisões (ABNT, 2009a). As normas que regulamentam o método são as NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b).

Este tipo de estudo tem um caráter relativo, uma vez que cada ACV é realizada em torno de uma unidade funcional ou unidade de referência, que representa o desempenho quantificado de um sistema de produto. Isso serve para estabelecer uma base de comparação entre dois sistemas distintos e tornar possível a análise entre eles. O sistema de produto, que é o próprio objeto de interesse do estudo, é composto por processos elementares, os quais fazem trocas entre si, com outros sistemas de produto ou com o meio ambiente através de fluxos. (ABNT, 2009a)

A ACV é dividida em quatro fases, sendo: a) definição de objetivo e escopo; b) análise de inventário; c) avaliação de impactos e d) interpretação. O escopo, a fronteira do sistema e o nível de detalhamento são definições da primeira fase, que dependem do objetivo pretendido para o estudo e determinarão sua abrangência. (ABNT, 2009a)

A norma europeia BS EN 15804 (CEN, 2014), que trata da ACV de construções e da elaboração de declarações ambientais de produtos (EPDs) da construção civil, aborda de forma bastante objetiva a definição das fronteiras do sistema, dividindo o ciclo de vida em módulos ou etapas (de A a D), conforme mostra a Figura 5. Uma ACV que considera apenas o estágio de produção (módulos A1 a A3) possui uma abordagem do berço ao portão (*cradle-to-gate*); uma avaliação completa do ciclo de vida do produto (módulos A1 a C4) é denominada do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) e leva em conta desde a extração de matérias primas, a produção, o transporte, o uso, a manutenção, até a disposição final no fim de vida. A etapa D (reuso, reciclagem) é opcional a qualquer estudo.

Figura 5 – Etapas do ciclo de vida de um produto



(fonte: adaptado de BS EN 15804 (CEN, 2012))

A segunda fase de uma ACV é a análise de inventário do ciclo de vida (ICV) e compreende a coleta de dados referentes aos processos elementares incluídos na fronteira do sistema, os quais podem provir de diferentes fontes (ABNT, 2009b): dados primários são medidos ou calculados diretamente no sistema e os secundários são coletados indiretamente em outros estudos, relatórios ou bases de dados consolidadas (por exemplo, *ecoinvent*, ELCD,



etc.) (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015). Os valores de entradas e saídas quantificados para o inventário serão usados posteriormente na avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) (ABNT, 2009a).

A AICV é a fase que traz significância aos valores do ICV, ao aplicá-los em categorias de impacto selecionadas, obtendo resultados de algum indicador. Existem muitos métodos, ou modelos de caracterização, para realização de uma ACV, os quais envolvem suas próprias categorias de impacto. Hischer *et al.* (2010) descrevem detalhadamente os principais métodos utilizados, dos quais se destacam, no cenário brasileiro, o CML-IA e o Eco-Indicator 99 (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015). A EN 15804 (CEN, 2014) também indica o CML para realização das EPDs. Stranddorf *et al.* (2005) expõem diversas categorias de impacto existentes e reconhecidas internacionalmente, pontuando que o método e as categorias escolhidos dependem do objetivo do estudo e do tipo de decisões que serão tomadas a partir dele. Recentemente, a Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) publicou o Relatório de Recomendações de Modelos de Avaliação de Impacto para o Contexto Brasileiro (IBICT, 2019), a fim de adaptar e desenvolver modelos de caracterização considerando o contexto nacional, através da regionalização dos fatores de caracterização de algumas categorias de impacto.

A interpretação, etapa que permeia todo o estudo, sintetiza os resultados de uma ICV e/ou AICV para elaboração de conclusões e recomendações a respeito do desempenho ambiental do produto (ABNT, 2009a). Segundo Bribián, Capilla e Usón (2011), a ACV deve auxiliar em processos de tomada de decisão ao selecionar a melhor tecnologia disponível e minimizar os impactos ambientais de uma construção em sua concepção.

### 2.3 Avaliação do Ciclo de Vida do Concreto Têxtil

O CT teve grandes avanços desde a década de 90, quando começou a ser estudado, em termos de conhecimento sobre as propriedades de seus componentes e sua inter-relação, modelos, possíveis aplicações práticas e sua resposta estrutural. No entanto, as pesquisas focadas diretamente em suas características ambientais, com o uso da técnica da ACV em específico, surgiram somente na década passada e ainda são escassas.

Tomoscheit *et al.* (2011) realizaram um estudo de ACV para comparar um sistema de fachada sanduíche autoportante de CT (com reforço de fibra de vidro AR), executada na RWTH Aachen University, com uma solução convencional de CA. Concluiu-se que o CT apresenta grande potencial ecológico como material construtivo, relacionado à redução de CO<sub>2</sub>, ao apresentar resultado 50% menor na categoria de mudança climática (*Global Warming Potential – GWP*) que o da solução convencional.

Uma análise quantitativa e qualitativa da sustentabilidade do concreto reforçado com diferentes tipos de têxtil (vidro AR, carbono e basalto) foi desenvolvida por Portal *et al.* (2015), em termos da redução de uso de recursos e emissões (entradas-saídas) e da durabilidade, em comparação com o CA. A análise quantitativa de entradas-saídas compreendeu uma ACV sob uma perspectiva do berço ao portão de uma unidade de referência de 1 m<sup>2</sup> de concreto. O foco dessa abordagem foi o impacto da redução de concreto nos elementos de CT, não levando em conta as fases de construção, uso e fim de vida. No estudo se evidencia o impacto dominante do concreto. Pelo método do CED (*Cumulative Energy Demand*), as fibras de carbono e de vidro AR isoladamente apresentam demanda de energia acumulada maior que o aço. Entretanto, a diminuição da quantidade de concreto, possibilitada na produção dos componentes de CT, compensa essa demanda maior dos reforços. Para os quatro materiais avaliados, o concreto tem uma parcela de 55-90% de contribuição na demanda de energia total nos elementos reforçados (PORTAL *et al.*, 2015).

Nas categorias de avaliação de impacto do CML 2001 (depleção abiótica, acidificação, mudança climática e ecotoxicidade total), o CA também apresenta o maior impacto ambiental.

Mais recentemente, Laiblová *et al.* (2019) elaboraram um estudo comparativo de ACV para fachadas de CA e de CT, feitas com três têxteis diferentes (vidro AR, carbono e basalto). A unidade de referência é uma fachada experimental de 60 m<sup>2</sup> e uma vida útil de 100 anos, utilizando uma abordagem do berço ao túmulo. Semelhante aos estudos anteriores, as fachadas de CT se mostram ambientalmente mais favoráveis que a de CA. Em quatro das seis categorias de impacto analisadas (acidificação, eutrofização, mudança climática e formação de ozônio troposférico), os valores são, em média, 30% menores para os reforços têxteis. Para as categorias de depleção abiótica e depleção da camada de ozônio há aumentos (especialmente para a fibra de carbono) ou valores muito semelhantes aos do CA (LAIBLOVÁ *et al.*, 2019).

Nesse contexto de poucas pesquisas acerca do desempenho ambiental desse material inovador, surge a motivação para este estudo, sendo pioneiro em âmbito nacional. Assim, busca-se fomentar o interesse no tema, tornando-o mais acessível no país e fornecendo fundamentos alinhados com a produção acadêmica internacional.

### 3 MÉTODO

#### 3.1 Estudo de Caso

O presente trabalho busca realizar um estudo de ACV de duas passarelas de concreto – uma reforçada com aço e outra com têxtil –, com base no trabalho de Morassutti (2016), que abordou o dimensionamento de suas superestruturas. Morassutti (2016) comparou o processo de dimensionamento e as duas soluções com o foco em questões puramente estruturais. Este trabalho, por sua vez, visa investigar as questões ambientais dos materiais componentes das passarelas.

As passarelas projetadas não possuem localização exata definida. Foi arbitrada a instalação das mesmas em uma rodovia expressa de quatro faixas, uma vez que condições de contorno de locais específicos não fizeram parte do escopo do estudo base. Neste trabalho, adotam-se como localização as proximidades da cidade de Porto Alegre, RS, com a finalidade de simular possíveis cenários de distâncias a serem percorridas e os impactos associados.

Ressalta-se que, ao serem projetadas, as duas passarelas foram consideradas como equivalentes, tendo a mesma função e as mesmas dimensões principais (comprimento e largura), mas os métodos para o dimensionamento de cada uma foram distintos. Para a de CA utilizaram-se normativas brasileiras já consolidadas (NBR 6118/2014, NBR 7188/2013 e NBR 8681/2003), enquanto, para a de CT, foram seguidas as recomendações e modelos teórico-experimentais presentes na literatura disponível, desenvolvida principalmente pelos pesquisadores das universidades alemãs de Aachen e Dresden (MORASSUTTI, 2016).

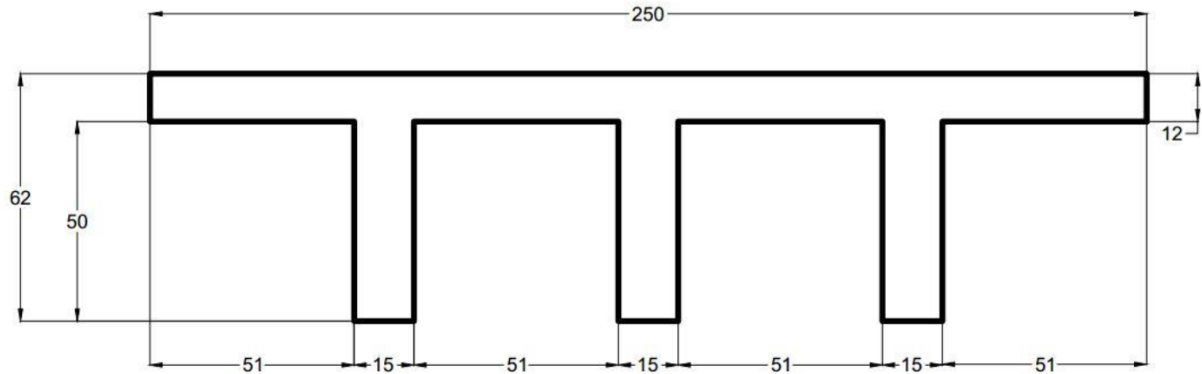
Dessa forma, as cargas atuantes em ambas as estruturas foram o peso próprio e a carga móvel de utilização definida por norma. As dimensões foram determinadas como largura sendo 2,50 m e comprimento sendo 25,00 m (dividido em dois vãos livres de 12,50 m).

O resultado final do dimensionamento fornece a geometria transversal específica de cada passarela e a quantidade de reforço (armadura ou têxtil) necessária para suportar a carga de projeto, conforme segue.

### 3.1.1 Características da Passarela de Concreto Armado

A passarela de CA foi projetada com uma seção transversal triplo T, cujas dimensões podem ser vistas na Figura 6 e estão reunidas na Tabela 1, juntamente com outras características principais.

Figura 6 – Seção transversal da passarela de concreto armado



(fonte: Morassutti, 2016)

Tabela 1 – Informações e dimensões da passarela de concreto armado

Parâmetro	Quantidade	Unidade
Comprimento dos vãos	12,50	m
Número de vãos	2	unid
Largura total	2,50	m
Espessura da mesa	0,12	m
Largura das vigas	0,15	m
Altura total (alma e mesa)	0,62	m
Cobrimento	3,00	cm
Área da seção	0,53	m <sup>2</sup>
$f_{ck}$ do concreto (28 dias)	40,00	MPa

(fonte: elaborada pelo autor)

O concreto utilizado não foi especificado quanto ao seu traço e ao tipo de cimento, somente quanto à resistência, sendo esta de 40 MPa.

Morassutti (2016) realizou o dimensionamento para o estado limite último e a verificação para o estado limite de serviço, resultando nos valores de armadura apresentados na Tabela 2. A armadura de pele não foi calculada diretamente, sendo apenas indicada como uma porcentagem da área da geometria da viga, portanto não é considerada neste trabalho.

Tabela 2 – Quantidade de armadura da passarela de concreto armado

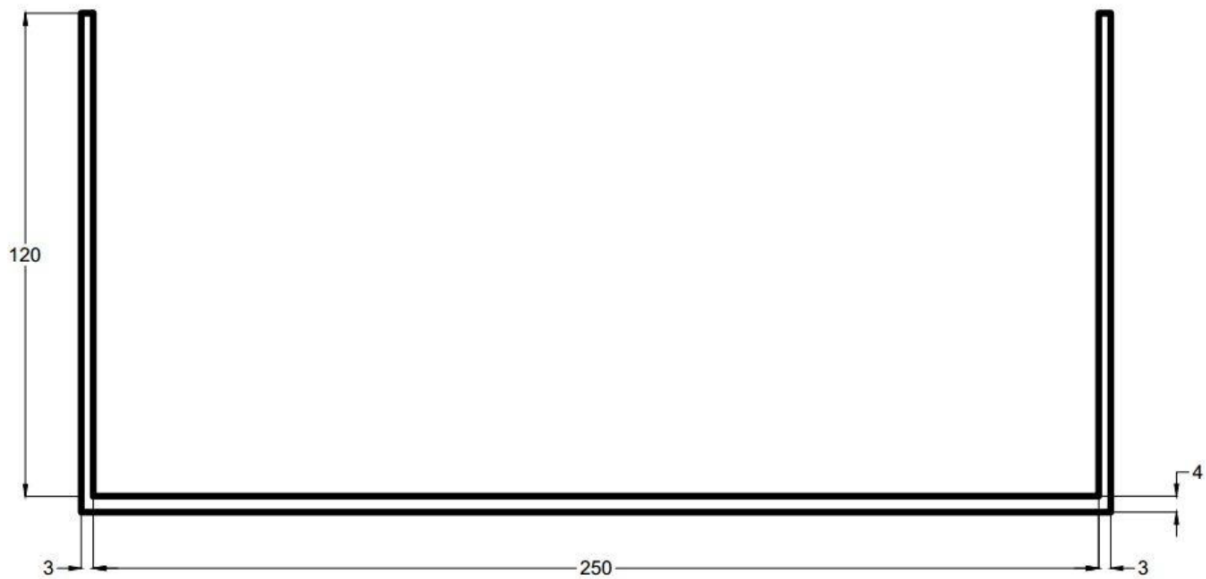
Tipo de armadura	Quantidade
Longitudinal	6 Ø25 mm (30 cm <sup>2</sup> )
Transversal alma	3 Ø6,3 mm a cada 25 cm (7,47 cm <sup>2</sup> /m)
Transversal mesa	Ø6,3 mm a cada 50 cm (1,25 cm <sup>2</sup> /m)

(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.1.2 Características da Passarela de Concreto Têxtil

Diferentemente da primeira estrutura, a passarela de CT possui seção transversal em formato de calha ou U, seguindo geometrias semelhantes de projetos e estudos prévios. A Figura 7 mostra a seção transversal e suas dimensões, e a Tabela 3 reúne as principais características do elemento.

Figura 7 – Seção transversal da passarela de concreto têxtil



(fonte: Morassutti, 2016)

Tabela 3 – Informações e dimensões da passarela de concreto têxtil

Parâmetro	Quantidade	Unidade
Comprimento dos vãos	12,50	m
Número de vãos	2	unid
Largura total	2,50	m
Espessura do tabuleiro	0,04	m
Espessura dos guarda-corpos	0,03	m
Altura dos guarda-corpos	1,20	m
Área da seção	0,17	m <sup>2</sup>
$f_{ck}$ do concreto (28 dias)	87,10	MPa

(fonte: elaborada pelo autor)

Para o caso do CT, o traço do concreto foi especificado por Morassutti (2016), uma vez que, por ser um material inovador e com características complexas, a matriz utilizada influí muito em seu comportamento e desempenho. Assim, foi indicado o traço M9-15 desenvolvido por Hegger *et al.* (2010), usado na construção da passarela de 100 m em Albstadt, na Alemanha. A resistência desse concreto aos 28 dias é de 87,1 MPa, e a Tabela 4 apresenta os seus componentes e quantidades.

Tabela 4 – Traço M9-15 do concreto utilizado para a passarela de concreto têxtil

Material	Quantidade	Unidade
Cimento CEM II/A-LL 42,5 R	450,00	kg/m <sup>3</sup>
Cinza volante	100,00	kg/m <sup>3</sup>
Metacaulim	31,50	kg/m <sup>3</sup>
Água	213,80	kg/m <sup>3</sup>
Areia 0- 4 mm	1457,40	kg/m <sup>3</sup>
Microesferas ocas	3,00	kg/m <sup>3</sup>
Relação a/c	0,41	-

(fonte: adaptado de Hegger *et al.*, 2010)

O tipo de reforço têxtil escolhido foi o de fibra de vidro AR impregnada com resina epóxi. O processo de dimensionamento consistiu basicamente na adoção de coeficientes que reduzem consideravelmente a capacidade resistente do material, por conta dos problemas encontrados na aderência da matriz ao reforço e das incertezas relacionadas aos modelos e às propriedades dos materiais.

Somente o dimensionamento para o estado limite último foi realizado, em função, segundo Morassutti (2016), da inexistência de modelos consolidados para estimar a fissuração e as deflexões do CT, e, assim, poder verificar o estado limite de serviço da estrutura. Salienta-se que, para o cálculo da área de reforço resistente ao momento fletor, considerou-se de forma conservadora a disposição do têxtil apenas no tabuleiro da passarela, enquanto, na realidade, foi estipulada a continuidade de uma camada para os guarda-corpos (por conta da concentração de momentos, no sentido transversal, no encontro entre o tabuleiro e os guarda-corpos).

As propriedades do têxtil e as quantidades necessárias de reforço calculadas são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades e quantidades do reforço de fibra de vidro álcali-resistente

Parâmetro	Quantidade
Área da seção transversal do têxtil	105 mm <sup>2</sup> /m
Área de têxtil ao longo do tabuleiro	2,625 cm <sup>2</sup>
Número de camadas de têxtil necessárias	2
Número de camadas de têxtil nos guarda-corpos	1
Altura do têxtil nos guarda-corpos	50 cm
Área de têxtil total	6,3 cm <sup>2</sup>

(fonte: elaborada pelo autor)

## 3.2 Objetivo e Escopo da ACV

Dada a economia de concreto evidenciada pelos resultados do dimensionamento estrutural das passarelas, decidiu-se prosseguir na investigação do desempenho ambiental do CT através da ACV, para confirmar as tendências de produzir menores impactos que o CA e sugerir-lo como um possível material substituto mais favorável ambientalmente no Brasil. Dessa forma, o objetivo da ACV é comparar a passarela de CT com a passarela de CA.

### 3.2.1 Unidade Funcional

Como as estruturas foram projetadas para atender à mesma função (servir de passagem em uma rodovia expressa de quatro faixas), resistir aos mesmos carregamentos (peso próprio e carga móvel determinada por norma), com comprimento e largura iguais e sob as mesmas condições de contorno, a unidade funcional (UF) do estudo é uma unidade de passarela.

### 3.2.2 Sistema de Produto e Fronteira do Sistema

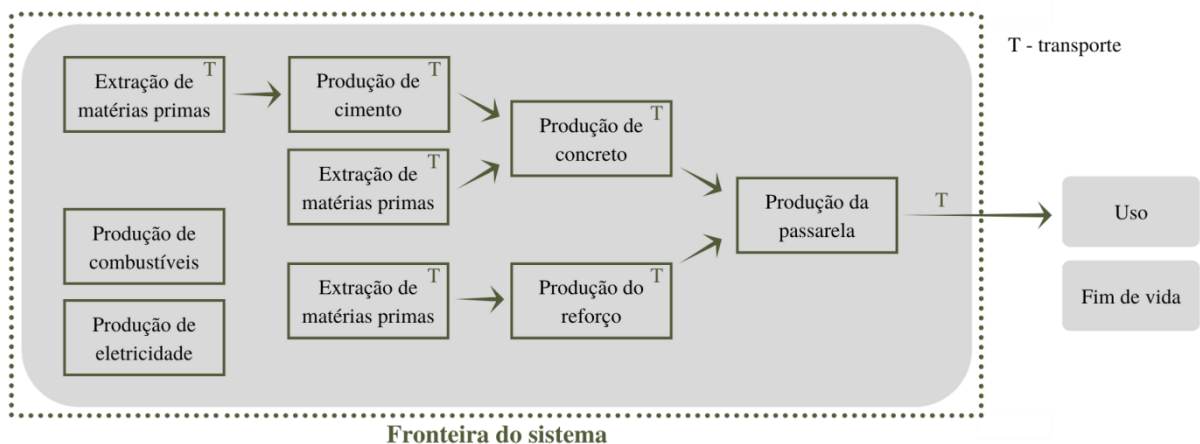
O fator de maior influência na melhora do desempenho ambiental do CT é a diminuição do volume de concreto, conforme mencionado e indicado em estudos prévios. Entretanto, o reforço têxtil com as características de resistência exigidas para o uso do estudo não é fabricado no Brasil. Esses reforços são provenientes da Alemanha em sua maioria. Logo, essas são as principais variáveis que poderiam influenciar os resultados da passarela de CT no país. Enquanto, por um lado, há a redução de volume de concreto, por outro existe a necessidade de importação de um dos componentes, além de o concreto possuir  $f_{ck}$  e consumo de cimento maiores, o que poderia aumentar os valores dos impactos associados a todo o processo.

Esses fatores fazem parte ainda da etapa de construção da passarela, envolvendo a obtenção de insumos e materiais para a sua produção. Por isso, foi decidido realizar a ACV com uma abordagem do berço ao portão. De acordo com a divisão de etapas da BS EN 15804 (CEN, 2014) (Figura 5), o estudo compreende os módulos A1 a A4. Entende-se que, se na

etapa de produção já fossem evidenciadas as vantagens do CT em relação ao CA, tais resultados seriam apenas reforçados com a extensão das fronteiras do sistema para as fases de uso e de fim de vida – uma vez que se sugere uma frequência de manutenções menor para os elementos de CT, por não sofrerem corrosão. Assim, apesar de equivalentes, as passarelas possuem desempenhos diferentes (quanto à durabilidade, por exemplo), sendo uma limitação deste trabalho a desconsideração de tais aspectos.

Por conseguinte, os seguintes processos e entradas são considerados no sistema de produto das passarelas (conforme ilustra a Figura 8): produção do concreto (com transportes de matérias primas para a concreteira, desde a produção do cimento), reforço de cada passarela (aço ou têxtil, com transportes para a concreteira) e transporte final das estruturas para o local de instalação. Elas são consideradas como pré-fabricadas.

Figura 8 – Sistema de produto das passarelas



(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.3 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

#### 3.3.1 Quantitativos dos Materiais

Os quantitativos foram levantados a partir dos resultados do dimensionamento, obtendo-se o valor total na unidade padrão de cada dado escolhido para o inventário do estudo. Portanto, o volume de concreto foi calculado em  $m^3$  e a massa de aço e de têxtil em kg, como é mostrado na Tabela 6.

Para o cálculo da quantidade em massa de aço, o comprimento das barras longitudinais foi simplificado. Dessa forma, adotou-se o comprimento total da viga (25 m), uma vez que não foi feito detalhamento de projeto. Os estribos foram calculados considerando as dimensões da estrutura, o cobrimento estipulado em projeto e ganchos de 7 cm, com um total de 300 unidades para as almas e 50 unidades para a mesa.

O têxtil, por ser uma malha bidimensional, teve sua área calculada em ambas as direções. A massa específica utilizada foi de  $2,8 \text{ kg/dm}^3$  (GRIES *et al.*, 2006). A quantidade de resina epóxi foi determinada com base em Raupach *et al.* (2006), que definem o conteúdo de polímero de um fio como aproximadamente 23% da massa do fio.

Tabela 6 – Quantitativos dos materiais das passarelas de concreto armado e concreto têxtil

	Material	Quantidade	Unidade		Material	Quantidade	Unidade
Concreto armado	Concreto	13,25	$m^3$	Concreto têxtil	Concreto	4,30	$m^3$
	Aço	746,76	kg		Têxtil	88,20	kg
	-	-	-		Resina epóxi	20,29	kg

(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.3.2 Inventário e Conjunto de Dados

Os dados utilizados para compor o inventário do estudo foram retirados da base *ecoinvent* versão 3.6, com o modelo de sistema de alocação com corte por classificação (*allocation, cut-off by classification*). A seleção foi feita de acordo com aqueles que mais se aproximavam dos componentes reais da passarela. A utilização de conjuntos de dados representando diferentes materiais para os componentes das passarelas não foi considerada (por exemplo, comparando diferentes tipos de fibra para o reforço têxtil). A mudança dos materiais demandaria novos cálculos de dimensionamento e resultaria em valores distintos de quantitativos, o que não fez parte do escopo deste trabalho, sendo uma limitação.

Dados específicos para o Brasil foram escolhidos quando disponíveis, uma vez que, na base, a maioria deles é formada por informações da Europa ou com aplicação global. Quando não foi possível, selecionou-se a opção *RoW (Rest-of-World)* ou GLO (global). No caso do CT, os dados referentes ao reforço foram selecionados propositalmente com a localização da Europa (*RER*), uma vez que foi definida a origem do têxtil na Alemanha.

Os conjuntos de dados (*datasets*) do concreto refletem a sua manufatura segundo informações de concreteiras brasileiras conectadas a processos disponíveis na base de dados. A produção de cimento incluída no processo também conta com valores brasileiros, o que contribui para a confiabilidade dos resultados. Para as duas passarelas, foi escolhido um *dataset* de concreto com um traço genérico predefinido e  $f_{ck}$  igual ao utilizado no dimensionamento do CA (40 MPa). O tipo de cimento selecionado é equivalente àquele indicado por Morassutti (2016) no traço do CT, uma vez que não haviam sido determinados um traço e cimento específicos para o CA. Segundo a norma europeia BS EN 197-1 (CEN, 2011), o cimento CEM II/A-LL possui teor de clínquer de 80-94% e de calcário de 6-20%. Para o estudo, considera-se que este corresponde ao cimento brasileiro CP II-F, portanto foi escolhido na base o concreto com cimento calcário 6-10%. No caso do CT, foi feita uma adaptação no *dataset* para equivaler ao traço de Hegger *et al.* (2010) de  $f_{ck}$  igual a 87 MPa, sendo as quantidades de cada componente modificadas para ficar o mais próximo possível do apresentado na Tabela 4. Os valores foram multiplicados por um fator de 1,038, uma vez que o *dataset* original considerava esse acréscimo (3,8%) para contabilizar as perdas envolvidas no processo. A Tabela 7 mostra as alterações realizadas. A cinza volante e o metacaulim não foram incluídos, por serem considerados resíduos de outros processos e não possuírem valor de impacto agregado. As microesferas também não foram acrescentadas, pois Hegger *et al.* (2010) as descrevem como necessárias para a situação de gelo/degelo.

Tabela 7 – Adaptação do *dataset* de concreto para o concreto têxtil

Dataset adaptado	Dataset original	Input	Quantidade adaptada	Quantidade original
<b>concrete production, 87MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% - BR</b>	<i>concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% - BR</i>	cement, limestone 6-10%	467,10	399,63
		gravel, crushed	0,00	1390,92
		sand	1512,78	403,78
		tap water	221,92	189,95

(fonte: elaborada pelo autor)

Quanto aos reforços, para o aço escolheu-se o dado genérico existente (tipo global). Para o têxtil foi necessária a elaboração da unidade de seu processo de produção, visto que não está disponível na base de dados processo que corresponda ao reforço têxtil de fibra de vidro AR impregnada com resina epóxi. Dessa maneira, foram escolhidos *datasets* para a produção de fibra de vidro e para resina epóxi líquida, desconsiderando a manufatura da malha têxtil, sendo também uma limitação do trabalho.

O transporte foi considerado para quase todos os componentes das passarelas, através da inserção de *providers* do tipo *market*, ou seja, um dado de mercado para um insumo de produção generalizada, que contém estimativas dos transportes de fornecimento (MORAGA, 2017). Foram incluídos, ainda, os transportes específicos dos cenários elaborados: assumiu-se o transporte marítimo do reforço têxtil vindo da Alemanha para o Brasil (aproximadamente 10000 km, do porto de Hamburgo até o porto de Santos); o rodoviário do reforço têxtil no Brasil (aproximadamente 1100 km, de Santos, SP, até Porto Alegre, RS); e o rodoviário de ambas as passarelas prontas, para serem levadas ao seu destino final (local indefinido, estimado a 100 km de distância, para cidades próximas à região metropolitana de Porto Alegre). Os transportes específicos possuem somente uma viagem considerada (ida). Para as passarelas prontas, apenas um caminhão é pressuposto para carregar os dois vãos de 12,5 m, sendo um veículo de maior capacidade de carga para a de CA, por ser mais pesada.

Há limitações em relação aos transportes considerados, uma vez que não se definiram localizações e distâncias exatas para a execução e a instalação das estruturas, e também aos processos de produção das mesmas, pois não estão inclusos dados referentes à pré-fabricação em indústria. Os insumos necessários para a execução estão incluídos nos *datasets* (do concreto, por exemplo), mas não foram detalhados os processos mencionados, levando em conta particularidades de moldagem do CT, por exemplo.

A Tabela 8 e a Tabela 9 apresentam os conjuntos de dados para as duas passarelas.

Tabela 8 – Conjunto de dados selecionados para a passarela de concreto armado

Material	Conjunto de dados	Quantidade	Unidade
Concreto	<i>concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% - BR</i>	13,25	m <sup>3</sup>
Aço	<i>market for reinforcing steel - GLO</i>	746,76	kg
Transporte passarela	<i>transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, EURO3 - RoW</i>	3312,50	t.km

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 9 – Conjunto de dados selecionados para a passarela de concreto têxtil

Material	Conjunto de dados	Quantidade	Unidade
Concreto	<i>concrete production, 87MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% - BR</i>	4,30	m <sup>3</sup>
Têxtil	<i>glass fibre production - RER</i>	88,20	kg
	<i>market for epoxy resin, liquid - RER</i>	20,29	kg
Transporte têxtil	<i>transport, freight, sea, container ship - GLO</i>	882,00	t.km
	<i>transport, freight, lorry 3,5-7,5 metric ton, EURO3 - RoW</i>	97,02	t.km
Transporte passarela	<i>transport, freight, lorry 7,5-16 metric ton, EURO3 - RoW</i>	1075,00	t.km

(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.4 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Na etapa de quantificação dos impactos do ciclo de vida, usou-se o método da CML (2001) da *University of Leiden* para o cálculo das sete categorias de impacto exigidas pela norma europeia BS EN 15804 (CEN, 2014) para a elaboração de *EPDs*: depleção abiótica para recursos não-fósseis (*ADPE*), depleção abiótica para recursos fósseis (*ADPF*), acidificação (*AP*), eutrofização (*EP*), mudança climática (*GWP*), depleção da camada de ozônio (*ODP*) e formação de ozônio troposférico (*POCP*).

O *software* utilizado para a elaboração dos cenários, cálculo do inventário e avaliação dos impactos é o *openLCA* versão 1.10.2 da *GreenDelta* (GREENDELTA, 2020).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para os impactos potenciais das passarelas são mostrados na Tabela 10 com os valores totais e na Figura 9 em forma de gráficos com as parcelas de contribuição de cada material ou processo.

Tabela 10 – Resultados das categorias de impacto de ACV para as passarelas de CA e CT

Categoria de impacto	Passarela CT	Passarela CA	Unidade
Depleção abiótica para recursos não-fósseis (ADPE)	4,30E-04	1,20E-04	kg Sb eq.
Depleção abiótica para recursos fósseis (ADPF)	1,91E+04	4,86E+04	MJ
Acidificação (AP)	7,68E+00	2,12E+01	kg SO <sub>2</sub> eq.
Eutrofização (EP)	1,93E+00	7,00E+00	kg (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> - eq.
Mudança climática (GWP)	2,55E+03	6,99E+03	kg CO <sub>2</sub> eq.
Depleção da camada de ozônio (ODP)	2,10E-04	4,60E-04	kg CFC 11 eq.
Formação de ozônio troposférico (POCP)	4,03E-01	1,69E+00	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.

(fonte: elaborada pelo autor)

A passarela de CT apresenta valores significativamente menores que a de CA em praticamente todas as categorias. Somente na depleção abiótica para recursos não-fósseis (ADPE) o resultado é diferente, principalmente pela produção da resina epóxi e da fibra de vidro (que juntas representam quase 90% do valor total do impacto potencial). Tais resultados são semelhantes aos de Laiblová *et al.* (2019) para painéis de fachada, exceto pela categoria depleção da camada de ozônio (ODP), em que os impactos do CT também ultrapassam os do CA. Percebe-se nitidamente que a principal causa dos impactos maiores da passarela de CA nas outras seis categorias é o volume de concreto (por apresentar mais que o triplo de volume que a de CT nos quantitativos). Em todas essas categorias, os valores totais dos impactos do CA são, em média, três vezes maiores que do CT.

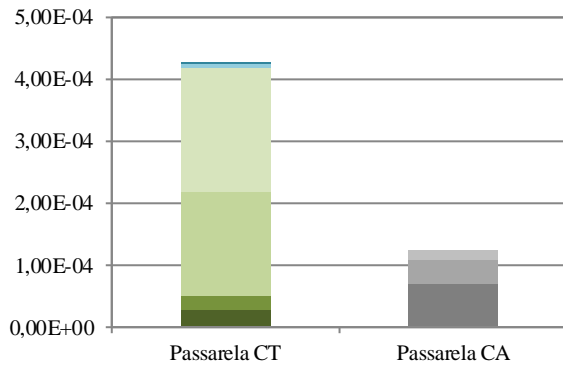
Para Laiblová *et al.* (2019), que realizaram a ACV sob a abordagem do berço ao túmulo e com maior detalhamento, as diferenças entre os dois materiais são um pouco mais sutis, indicando que talvez seja interessante fazer avaliações mais aprofundadas futuramente, a fim de aprimorar os valores obtidos para os impactos potenciais. Entretanto, em seu estudo não é possível diferenciar as etapas de produção, construção, uso e fim de vida no estudo, pois os resultados são apresentados apenas em valores totais. Assim, não há como avaliar se as etapas finais afetam significativamente os resultados.

A contribuição majoritária do concreto é evidenciada em ambos os elementos. Para a passarela de CT, nas seis categorias em que a maior contribuição é a desse material, os valores de seus impactos representam em média, 62% do total. Para a passarela de CA, em cinco das sete categorias há predominância do concreto, representando uma média de 64% do total. Para a categoria mudanças climáticas (GWP), a contribuição é em torno de 75% para as duas passarelas. Esses valores vão ao encontro dos resultados do estudo de Portal *et al.* (2015), que observa contribuições de 55-90% pelo método do CED para uma UR de 1 m<sup>2</sup> de CA e CT.

Analisando os valores de impacto do concreto isoladamente nas diferentes categorias (exceto ADPE, em que as tendências são diferentes), observa-se que, para o CT e o CA, aproximadamente 72% da contribuição total do material refere-se à produção de cimento, e a produção de clínquer (inserida na do cimento) representa 67%. Na categoria GWP, os valores são em torno de 88% e 85%, respectivamente. Em termos dos valores totais de impacto de cada categoria, a produção de cimento tem parcela de 44%, e a de clínquer, 40%.

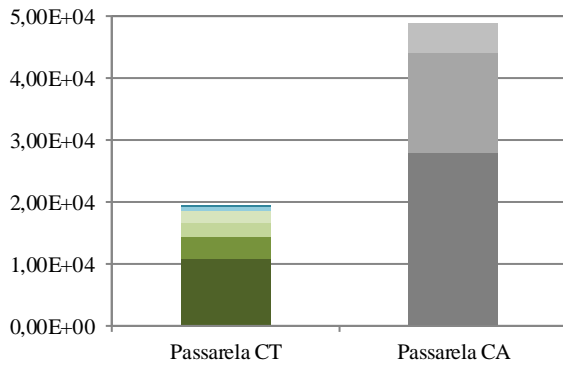
Figura 9 – Comparativo do impacto ambiental potencial das passarelas de CA e CT.

**a) ADPE [kg Sb eq/UF]**

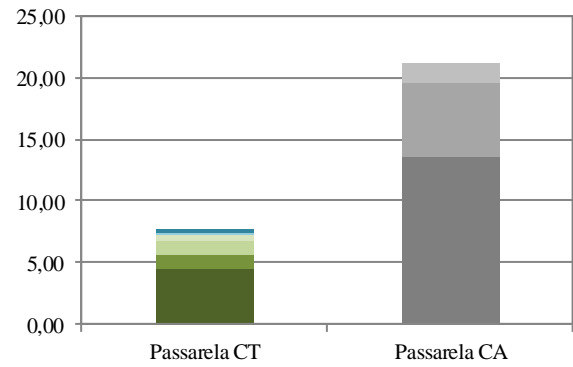


- Transporte passarela CA (rodoviário)
- Aço
- Concreto 40MPa
- Transporte têxtil (marítimo)
- Transporte têxtil (rodoviário)
- Resina epóxi
- Fibra de vidro
- Transporte passarela CT (rodoviário)
- Concreto 87MPa

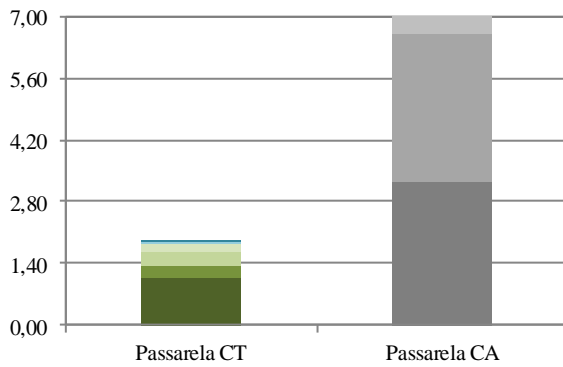
**b) ADPF [MJ/UF]**



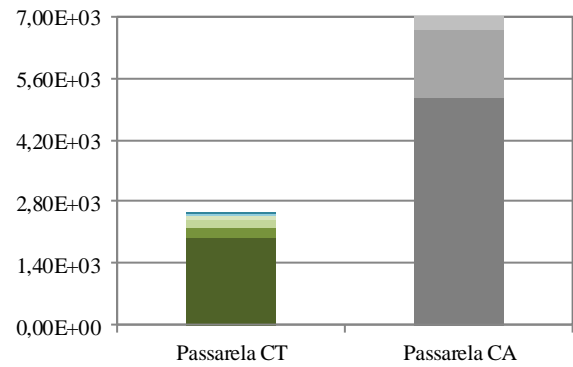
**c) AP [kg SO2 eq/UF]**



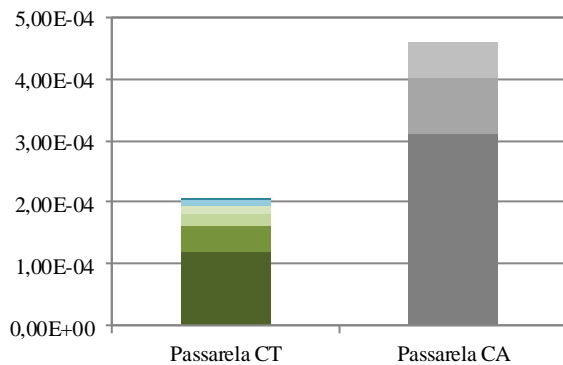
**d) EP [kg (PO4)3- eq/UF]**



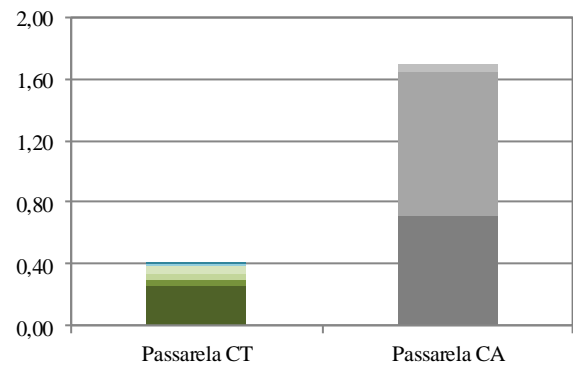
**e) GWP [kg CO2 eq/UF]**



**f) ODP [kg CFC 11 eq/UF]**



**g) POCP [kg C2H4 eq/UF]**



(fonte: elaborada pelo autor)

Dessa forma, destaca-se a grande influência da produção do cimento (em sua maioria pela produção de clínquer) nos impactos ambientais das estruturas. Mesmo que o CT tenha um traço mais rico em cimento para atingir resistências maiores, o fato de o CA usar um volume bastante maior de concreto resulta nas amplas diferenças descritas. A categoria GWP é a mais expressiva nesses aspectos, o que indica o grande potencial emissor de gases de efeito estufa desses processos.

A categoria ADPE apresenta resultados muito distintos, pois é sensível à disponibilidade em depósitos das matérias primas envolvidas nos processos (IBICT, 2019), indicando que possivelmente a fibra de vidro e a resina epóxi utilizam recursos menos abundantes. Apesar de o CT ter apresentado desempenho ambiental desfavorável apenas nesta categoria, tal fato deve ser levado em consideração, principalmente dependendo da abordagem dada para a avaliação dos resultados. Caso o interesse da análise seja relacionado à extração de recursos disponíveis na crosta terrestre, o CT não se mostra vantajoso em relação ao CA. Entretanto, este estudo não tem como objetivo dar foco a um aspecto ambiental específico, ou atribuir maior relevância a uma das sete categorias de impacto.

Na passarela de CT, os processos com a segunda maior participação variam de uma categoria para a outra. Em três delas (ADPF, GWP e ODP) é o transporte rodoviário da estrutura pronta; em outras duas (AP e EP) é a fibra de vidro; e para POCP é a resina epóxi. Entretanto, seus valores já são muito inferiores ao concreto, sendo em média 15% dos impactos totais. Os outros dois processos constituintes da produção do elemento, referentes aos transportes de grandes distâncias do reforço têxtil (marítimo e rodoviário), são inexpressivos em todas as categorias. Isso se dá provavelmente pela quantidade de reforço utilizado, inferior em uma ordem de grandeza à massa de aço necessária na passarela em CA.

Pontua-se, também, a incerteza relacionada aos resultados do reforço têxtil, uma vez que foi necessária a elaboração e adaptação de um *dataset* que representasse a unidade de seu processo de produção, pois não havia dado específico para o material. Para maior veracidade dos resultados, seria necessário haver um *dataset* disponível que refletisse todo o processo de forma mais detalhada, visto que a coleta de dados de produção do reforço está além do escopo deste trabalho.

Para a passarela de CA, duas categorias (EP e POCP) têm o aço como o material de maior impacto (média de 52% do total), mas por uma diferença não muito expressiva em relação ao concreto (44%). Nas outras cinco categorias (ADPE, ADPF, AP, GWP e ODP), as diferenças são maiores, com a predominância do concreto de 64%, conforme já mencionado, e o aço com 27%.

Ressalta-se que, diferentemente do cenário do CT, em que há a especificação do transporte do reforço por ter origem na Alemanha, deixando-se em separado os dados de deslocamento marítimo e rodoviário, para o aço do CA os transportes estão inclusos no próprio *dataset*, de forma estimativa, uma vez que ele é do tipo *market*. O transporte rodoviário da passarela pronta é o item de menor impacto em todas as categorias, representando em torno de 8% do total, embora seja, em média, 37% maior que o valor do transporte do elemento de CT.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, é possível inferir a partir dos resultados que o CT, para esse estudo de caso, possui amplas vantagens ambientais em relação ao CA no contexto brasileiro, mesmo envolvendo o uso de materiais de reforço não convencionais, os quais precisam ser importados e exigem transportes de longas distâncias. A grande diferença entre os dois materiais está, de fato, na quantidade bastante inferior de concreto necessária no CT.

Esses resultados discrepantes podem ser observados na ACV de abordagem do berço ao portão, ou seja, levando em conta apenas a fase de produção das passarelas. Sugere-se que a manutenção nos elementos de CT possa ser menos frequente que nos de CA, justamente por não estarem sujeitos a patologias de corrosão das armaduras. Tendo isso em vista, entende-se que, se comprovada a tendência de vantagem ambiental do CT já na etapa de produção, a expansão das fronteiras do sistema analisado para outras fases do CV apenas reforçaria os resultados observados. Isso significa que o objetivo deste trabalho foi alcançado através de uma avaliação concisa e acessível.

Este estudo abre oportunidades para discussões futuras a respeito desse material inovador e, inclusive, para ACVs mais completas e abrangentes, que reflitam com mais exatidão os valores de seus impactos potenciais. Como o trabalho se baseia em um projeto já desenvolvido, há limitações, e os resultados não podem ser diretamente aplicados a qualquer outro cenário envolvendo os dois materiais. Reitera-se também a necessidade de haver dados mais específicos dos componentes das passarelas (em especial do reforço têxtil).

Assim, conclui-se que o CT apresenta grande potencial em reduzir os impactos ambientais, e corroboram-se os impactos pronunciados da produção de concreto, de cimento e da construção civil em geral. Devem ser buscadas alternativas viáveis para a substituição dos materiais convencionalmente utilizados, sendo a ACV uma ferramenta possível para tais investigações.

## REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

BRAMESHUBER, W. *et al.* Concrete/Matrix. *In: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. Bagnex: RILEM Publications, 2006.

BRAMESHUBER, W.; BROCKMANN, T. Introduction. *In: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. Bagnex: RILEM Publications, 2006.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011.

CEN. **BS EN 197-1**. Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Bruxelas, 2011.

CEN. **BS EN 15804**. Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. Bruxelas, 2014.

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: Desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict), 2015.

DENARDI, A. **Concreto Têxtil: Uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DUTRA, V. F. P. *et al.* Concreto Têxtil: Desenvolvimentos e Perspectivas. **Anais do 59º**

**Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 13, 2017.

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

GREENDELTA. **OpenLCA v.1.10.2**. 2020. Disponível em: <https://www.openlca.org/>

GRIES, T. *et al.* Textiles. *In: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. Bagnex: RILEM Publications, 2006.

HEGGER, J. *et al.* Applications of Textile Reinforced Concrete. *In: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. Bagnex: RILEM Publications, 2006.

HEGGER, J. *et al.* TRC Pedestrian Bridge - Design, Load-bearing Behavior and Production Processes of a Slender and Light-weight Construction. **International RILEM Conference on Material Science**, v. I, p. 353–364, 2010.

HEGGER, J.; VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, v. 30, n. 7, p. 2050–2056, 2008.

HISCHIER, R. *et al.* Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2 (2010). **ecoinvent Report No. 3**, St. Gallen, p. 163, 2010. Disponível em: [https://www.ecoinvent.org/files/201007\\_hischier\\_weidema\\_implementation\\_of\\_lcia\\_methods.pdf](https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf)

IBICT, Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro**. Brasília, 2019.

IPCC, Intergovernmental Panel of Climate Change. Buildings. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 671–738, 2014.

KULAS, C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete. **GRCA Congress**, p. 1–11, 2015.

LAIBLOVÁ, L. *et al.* Environmental Impact of Textile Reinforced Concrete Facades Compared to Conventional Solutions - LCA Case Study. **Materials**, v. 12, n. 19, p. 1–13, 2019.

MORAGA, G. L. **Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

MORASSUTTI, D. S. **Passarela em Concreto Armado e Concreto Têxtil: Comparativo entre Metodologias de Dimensionamento**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

MORASSUTTI, D. S.; DUTRA, V. F. P. Comparação entre Metodologias de Projeto de uma Passarela de Concreto Armado e de Concreto Têxtil. **Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. 1–20, 2017.

NORA, J. B. **Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de**

- concreto armado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- ORTOLAN, V. K. **Estudo de matriz cimentícia reforçada com fibra têxtil para uso em painéis pré-fabricados**. 2019. Projeto de Qualificação (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2019.
- PORTAL, N. W. *et al.* Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, 2015.
- PORTAL, N. W. **Usability of Textile Reinforced Concrete: Structural Performance, Durability and Sustainability**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Chalmers University of Technology, 2015.
- PORTAL, N. W.; THRANE, L. N.; LUNDGREN, K. Flexural Behaviour of Textile Reinforced Concrete Composites: Experimental and Numerical Evaluation. **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, p. 1–24, 2017.
- RAUPACH, M. *et al.* Epoxy-impregnated textiles in concrete - Load bearing capacity and durability. **1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete**, p. 77–88, 2006.
- REINHARDT, H. W. *et al.* Bond. *In: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. Bagnoux: RILEM Publications, 2006.
- REMPEL, S. *et al.* Extremely Light and Slender Precast Pedestrian-Bridge Made Out of Textile-Reinforced Concrete (TRC). **High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet**, p. 2530–2537, 2017.
- REMPEL, S.; KULAS, C.; HEGGER, J. Bearing Behavior of Impregnated Textile Reinforcement. **11th International Symposium on Ferrocement and Textile Reinforced Concrete 3rd ICTRC**, n. 1, p. 71–78, 2015.
- SOLIDIAN. **Brückenbau**. 2019. Disponível em: <https://www.solidian.com/projekte/brueckenbau/>. Acesso em: 5 ago. 2020.
- STRANDDORF, H. K. *et al.* Impact categories, normalisation and weighting in LCA. **Environmental News**, v. 78, p. 90, 2005. Disponível em: <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-574-3/pdf/87-7614-575-1.pdf>
- TOMOSCHEIT, S. *et al.* Project Life Insu-Shell - Reducing the Carbon Footprint in Concrete Construction. **International Journal of Sustainable Technology and Urban Development**, v. 2, n. 2, p. 162–169, 2011.
- UN ENVIRONMENT. **Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People**. Nairobi, 2019. Disponível em: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27539/GEO6\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27539/GEO6_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- WBCSD, World Business Council for Sustainable Development. **The Cement Sustainability Initiative: Recycling Concrete**. 2009. Disponível em: <https://docs.wbcsd.org/2009/07/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>.