



## **Estudo comparativo sobre o impacto ambiental de diferentes sistemas de reforço estrutural utilizando ICV**

**Helena SzortikaQuadros<sup>1</sup>, Débora Marx de Almeida<sup>2</sup>, Juliane Natália Dolvitsch<sup>3</sup>**  
<sup>1,2,3</sup> Mestrandas em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGCI):  
Construção e Infraestrutura – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre - RS

### **Resumo**

Em função da crescente demanda por transporte de cargas nas rodovias brasileiras, a necessidade de adequação de pontes antigas, com Classes inferiores a 45 toneladas, tornou-se tempestiva. Os reforços estruturais são a alternativa para suprir esta demanda. Entretanto, a escolha do sistema a ser executado para estes reforços baseia-se principalmente no desempenho estrutural e econômico dos mesmos, sendo comumente ignorado o seu desempenho ambiental. Com este estudo se pretende avaliar a energia e o carbono incorporados a três opções de reforço estrutural, com aumento de seção de concreto, com fibra de carbono e com chapa de aço colada, concebidos e projetados para uma ponte hipotética, representativa da realidade das obras de arte brasileiras executadas até o ano de 1950. A avaliação baseou-se no método de avaliação de inventário de ciclo de vida (AICV). Concluiu-se que o reforço com aumento de seção apresenta maiores emissões e gasto energético incorporados, seguido pelo reforço com chapa de aço colada e, as menores emissões e energia incorporados foram percebidos no reforço com fibra de carbono.

### **Palavras-chave**

Inventário, ciclo de vida, reforço estrutural, pontes, energia incorporada, carbono incorporado.

### **Introdução**

Existe uma crescente preocupação em adotar medidas visando reduzir o impacto ambiental da construção civil. Sabe-se que tanto as fases de construção, manutenção e utilização das estruturas, sejam elas habitacionais ou de infraestrutura, acarretam diversos tipos de extração de recursos naturais, emissão de gases e geração de resíduos. Entretanto as estruturas são essenciais para garantir a moradia, o acesso à produtos e alimentos e o desenvolvimento econômico do país. Garantir que as estruturas existentes sejam duráveis com capacidade para se adaptar às condições atuais colabora com a redução dos impactos provocados por demolições e construção de novos elementos. Desta maneira, é essencial estudar os impactos provocados pelas alternativas de reforço e recuperação disponíveis no mercado.

As pontes são elementos vitais da infraestrutura no Brasil por se tratar de um país com extensa malha viária. Estas começaram a surgir desde o início da civilização, conforme o manual de inspeções de pontes e viadutos rodoviários (DNIT, 2004) IPR-709 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

As normas que caracterizam os trens-tipo rodoviários sofreram alterações ao longo dos anos. Atualmente, alguns projetos vêm sendo realizados são os de adequação do trem de carga de obras que foram construídas anteriores ao ano de 1950, porém ao alterar a carga solicitante de uma estrutura, necessitamos realizar o reforço da mesma.

Quanto à recuperação de estruturas existentes, REIS (2001) cita a diversidade das manifestações patológicas como limitador para elaboração de normas específicas de recuperação e reforço. A ênfase dos estudos desta área geralmente concentra-se em medir desempenho estrutural ou propor métodos de dimensionamento. Atualmente, os principais fatores que são decisivos para a escolha de determinado método de reforço são: o acréscimo na capacidade de carga e os custos com materiais e execução. A escolha da alternativa menos agressiva ao meio ambiente fica limitada a questões de durabilidade. Entretanto, embora a durabilidade seja um aspecto importante para a sustentabilidade, falta na literatura suporte para a tomada de decisão visando aspectos do ciclo de vida, como pegada de carbono e consumo de energia.

Desta maneira, o objetivo deste artigo é apresentar três opções de reforço estrutural para uma ponte hipotética localizada a 100 quilômetros de Porto Alegre e compará-las através de uma avaliação de ciclo de vida de forma a indicar solução com uma menor pegada de carbono e consumo energético, possibilitando exemplificar uma escolha de um sistema de reforço que possa ser utilizado como base por tomadores de decisão para escolher o método mais econômico, com melhor desempenho estrutural e ambiental entre as opções existentes no mercado.

### **Metodologia**

A Análise de Ciclo de Vida (ACV), segundo a NBR 14040 (ANBT, 2009), diz respeito a uma técnica de avaliação ambiental que envolve a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema, ao longo do ciclo de vida de um produto. Esta metodologia se mostra eficiente e eficaz para alcançar os objetivos deste estudo, que estará limitado à análise do inventário do ciclo de vida (AICV) sem a avaliação de impactos potenciais associados. A realização de uma ACV se faz de acordo com quatro etapas, avaliadas necessariamente na seguinte ordem (ABNT, 2009):

- 1) Definição do objetivo e o escopo, ou seja, definir e descrever o produto, o processo e as atividades, especificando o contexto no qual a avaliação será feita, as limitações do estudo e os impactos ambientais a ser avaliados;
- 2) Análise de inventário que é realizada através da compilação e quantificação das entradas e saídas do sistema de produtos ao longo de seu ciclo de vida;
- 3) Avaliação dos impactos, feita através da análise dos efeitos gerados à humanidade e à ecologia;
- 4) Interpretação, ou seja, a avaliação das constatações da análise de inventário e/ou da avaliação de impactos com relação ao objetivo e escopo definidos, buscando obter conclusões e recomendações.

### **Objetivo e escopo**

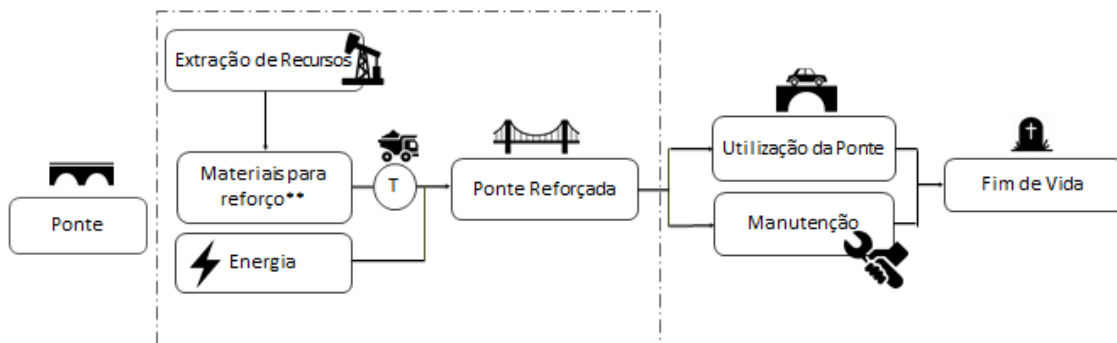
O principal objetivo deste estudo é estabelecer uma correlação entre os três sistemas de reforço estrutural avaliados, no sentido de seu desempenho ambiental. Secundariamente, pretende-se fomentar dados e informações para que projetistas deste tipo de reforço possam basear suas decisões sobre qual a melhor alternativa para seus projetos.

A Ponte estudada neste artigo é uma estrutura hipotética com vão de 10 metros localizada a cem quilômetros da cidade de Porto Alegre. A superestrutura é composta por uma laje de 0,20 metros engastada em duas vigas retangulares de 0,50 metros de

largura e 1,00 metro de altura. A seção transversal possui uma única pista de 3,60 metros, dois acostamentos de 0,50 metros e dois guarda-rodas de 0,20 metros totalizando a largura de 5,00 metros. A obra se desenvolve em tangente e em nível.

Esta ponte foi construída no ano de 1960 com Classe 36 (NB6/1960). Entretanto, para atender às demandas atuais de carregamento, a estrutura deverá comportar a Classe de 45t (NBR 7188/2013). Para o reforço da ponte estudada, foram calculados três diferentes sistemas: aumento de seção com material cimentício; fibra de carbono e chapa de aço colada. Após o dimensionamento destes reforços, foi realizado o estudo da ACV de cada um deles.

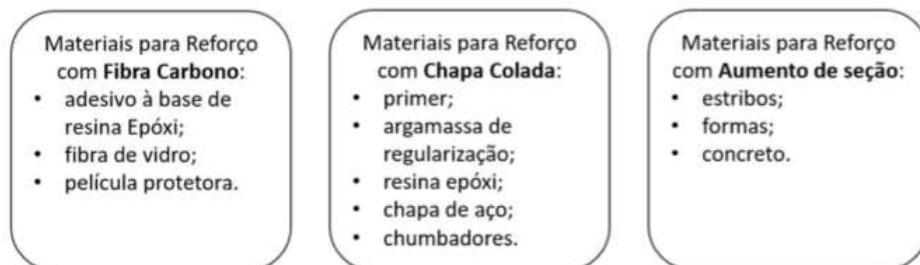
A partir da avaliação dos diferentes sistemas de reforço e do processo de reforço como um todo, um sistema de produto foi esquematizado, conforme Figura 1. Nele também foram definidas as fronteiras do sistema, que delimitam a abrangência desse estudo a fim de nortear o levantamento de dados da etapa de Inventário do Ciclo de Vida (ICV).



(Fonte: elaborado pelas autoras)

**Figura 1 – Sistema de produto e fronteiras do sistema.**

A definição da unidade funcional é um dos fatores chave para uma avaliação correta do ciclo de vida, ela deve permitir a comparação dos diferentes sistemas de produto que serão estudados. Para permitir estas comparações a unidade funcional adotada foi a própria ponte de 10 metros de comprimento e 5 metros de largura reforçada, uma vez que cada reforço se comporta de maneira diferente, impossibilitando a definição de unidades funcionais mais usuais como o  $m^2$  ou  $m^3$ . Os materiais que compõem cada um dos sistemas podem ser visualizados na Figura 2.



(Fonte: elaborado pelas autoras)

**Figura 2 - Materiais para cada alternativa de reforço.**

Com relação aos reforços estruturais avaliados, segundo CHASTRE (2014), é possível dividir os materiais utilizados em dois grandes grupos, o primeiro, o dos materiais cimentícios (concreto, argamassa de reparação, etc.) e das resinas. As funções principais destes materiais são resistir aos esforços de compressão, funcionar como proteção para as armaduras e possibilitar a transferência de esforços entre os elementos. O outro grupo é composto por materiais utilizados para aumentar a resistência à tração, como exemplo, temos o aço e os compósitos FRP (*fiber reinforced plastic*). CHRISTENSEN et al. (1996) definem os sistemas FRP como a combinação de uma matriz polimérica (por exemplo: resina epóxi) com uma fibra de alta resistência e elevada rigidez, sendo as mais comuns fibra carbono, fibra de vidro e fibra aramida.

Embora exista uma grande variedade de materiais de reforço, este artigo está limitado ao comparativo de apenas três soluções: fibra carbono, chapa de aço colada com resina epóxi e aumento de seção utilizando material cimentício. Os materiais que compõem cada alternativa e suas vantagens e desvantagens serão apresentadas nos itens a seguir.

#### Reforço com Fibra Carbono

Uma das alternativas adotadas neste artigo é a aplicação de um compósito FRP, no caso fibra carbono colada com resina epóxi. SOUDKI (2005) destaca que as grandes vantagens deste material são o baixo peso próprio (não gerando mais carga para a estrutura), alta resistência, o fato de ser não corrosivo, e, por se adaptar ao formato da peça de aplicação da fibra, esta solução pode ser utilizada em diferentes peças estruturais (vigas, pilares, lajes, colunas, túneis, silos, etc.) compostas por diferentes materiais (madeira, aço, ferro fundido e concreto). Quanto à execução, o reforço com fibras de carbono, de maneira geral, deve seguir as seguintes etapas conforme HAMILTON (2000):

- 1) Regularização e correção das imperfeições superficiais do substrato de concreto;
- 2) Aplicação da primeira camada de adesivo (considerou-se adesivo a base de resina epóxi);
- 3) Aplicação da lâmina de fibra;
- 4) Aplicação de película de acabamento.

#### Reforço com Chapa de Aço

O método de reforço com chapa de aço consiste na colagem de chapas, com espessuras calculadas em projeto, fixada por resina epóxi e parafusos auto-fixantes, originando uma espécie de armadura secundária solidária ao elemento reforçado, aumentando a resistência e a rigidez da peça (REIS, 2001). Segundo PALIGA (2008) a aceitação desta técnica está associada ao desenvolvimento de adesivos epóxi de qualidade elevada e por ser uma alternativa eficiente, com baixo custo, e de aplicação com poucas dificuldades executivas sem a alteração das dimensões da peça reforçada.

Para um desempenho adequado deste sistema é essencial garantir a qualidade no tratamento superficial da chapa para evitar a corrosão. Outro fator para o sucesso do reforço segundo REIS (2001) são os cuidados para evitar a ruptura frágil do sistema, que ocorre com o descolamento prematuro da chapa ou da ruptura no revestimento de concreto conhecida como "*peeling off*". Para evitar este inconveniente é essencial garantir uma aderência do reforço ao elemento e o correto dimensionamento dos chumbadores.

O método executivo adequado para aplicação da chapa de aço, conforme SANTOS (2008) deve seguir as etapas elencadas a seguir:

- 1) Lixar a superfície de concreto com lixa abrasiva para eliminar as partículas soltas;
- 2) Limpar a superfície de concreto com solvente para eliminar poeira e óleos;
- 3) Aplicar o “primer”;
- 4) Aplicar a argamassa de regularização sobre a superfície de concreto;
- 5) Lixar a regularização;
- 6) Aplicar a resina epóxi na espessura especificada;
- 7) Colar a chapa de aço;
- 8) Inserir os chumbadores.

#### Reforço com Aumento de Seção

Este tipo de reforço é o mais utilizado no Brasil e consiste em aumentar a seção de concreto da estrutura existente de forma a absorver os esforços solicitantes. CHASTRE (2014) menciona que esta alternativa garante ganhos resistência, rigidez e ductilidade da peça reforçada, sendo apropriada para quando existem danos significativos no concreto. O método executivo para a execução de aumento de seção segue o descrito abaixo:

- 1) Apicoamento da estrutura para a remoção do cobrimento e exposição das armaduras, aproximadamente 3 cm;
- 2) Execução de furos para a inserção dos estribos;
- 3) Limpeza da estrutura através de jato de ar comprimido;
- 4) Ancoragem dos estribos e montagem da armadura;
- 5) Instalação das formas;
- 6) Concretagem do reforço.

Para a alternativa de aumento de seção serão analisadas duas opções de execução, a tradicional que utiliza formas de madeira e uma segunda alternativa com concreto projetado. A alternativa tradicional, tem a sua execução faseada para possibilitar o adensamento do concreto, portanto é mais demorada que a segunda alternativa. O concreto projetado possui alto índice de reflexão o que faz com que seja utilizado mais concreto na segunda opção.

#### Inventário do ciclo de vida (ICV)

A maioria dos dados do ICV foram coletados a partir do banco de dados chamado *Inventory of Carbon and Energy (ICE) Beta Version V1.5*, concebido inicialmente por HAMMOND E JONES (2008). O único dado não disponível nessa base de dados foi o referente à fibra de carbono, cujos valores foram estimados como as médias dos intervalos de valores de 380 MJ/Kg a 420 MJ/Kg para energia incorporada e de 23,9 KgCO<sub>2</sub>/Kg a 26,4 KgCO<sub>2</sub>/Kg para o carbono incorporado, apresentados por ASHBY (2013). A Tabela 1 apresenta os dados do ICV relacionados às quantidades de cada um dos materiais necessários, obtidas a partir do dimensionamento de cada um dos reforços para o caso específico da ponte analisada. Também podem ser observadas as distâncias percorridas e modais de transportes destes materiais até o local da obra, a uma distância de 100km da cidade de Porto Alegre/RS, considerada como a origem da maioria dos materiais. Os materiais mais específicos como a fibra de carbono e camada de poliuretano são oriundos do Estado de São Paulo.



**Tabela 1 - Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**

Fibra de carbono	Base de dados	Peso (kg)	Tipo de transporte	Distância	ton*km
Apicoamento (e=0,5cm)	ICE - University of Bath	625,00	Caminhão	100,00 km	62,50
Primer bicomponente (e=1mm)	ICE - University of Bath	67,50	Caminhão	1230,00 km	83,03
Resina - 1ª e 2ª camada (e=1mm)	ICE - University of Bath	100,00	Caminhão	100,00 km	10,00
Fibra de Carbono - 1ª e 2ª camada (e=6mm)	Materials and the Environment: Eco-informed	0,18	Caminhão	1230,00 km	0,22
Camada de proteção poliuretano (e=2mm)	ICE - University of Bath	130,00	Caminhão	1230,00 km	159,90
					<b>315,65</b>
Chapa de Aço	Base de dados	Peso (kg)	Tipo de transporte	Distância	Distância
Apicoamento (e=0,5cm)	ICE - University of Bath	125,00	Caminhão	100,00 km	12,50
Resina (e=1mm)	ICE - University of Bath	13,50	Caminhão	100,00 km	1,35
Furo e = 10cm	ICE - University of Bath	3926,99	Caminhão	100,00 km	392,70
Chapa de aço (e=8mm)	ICE - University of Bath	624,00	Caminhão	100,00 km	62,40
Parafuso	ICE - University of Bath	1225,22	Caminhão	100,00 km	122,52
					<b>591,47</b>
Concreto - metodo tradicional	Base de dados	Peso (kg)	Tipo de transporte	Distância	Distância
Apicoamento (e= 3cm)	ICE - University of Bath	3750,00	Caminhão	100,00 km	375,00
Furos e = 50cm e=12,5mm	ICE - University of Bath	2454,37	Caminhão	100,00 km	245,44
Aço	ICE - University of Bath	759,46	Caminhão	100,00 km	75,95
Forma (e=3mm)	ICE - University of Bath	93,60	Caminhão	100,00 km	9,36
Concreto	ICE - University of Bath	65000,00	Caminhão	100,00 km	6500,00
					<b>7205,74</b>
Concreto - projetado	Base de dados	Peso (kg)	Tipo de transporte	Distância	Distância
Apicoamento (e= 3cm)	ICE - University of Bath	3750,00	Caminhão	100,00 km	375,00
Furos	ICE - University of Bath	2454,37	Caminhão	100,00 km	245,44
Aço	ICE - University of Bath	759,46	Caminhão	100,00 km	75,95
Concreto projetado (20% reflexão)	ICE - University of Bath	78000,00	Caminhão	100,00 km	7800,00
Concreto projetado (20% reflexão)	ICE - University of Bath	13005,20	Caminhão	100,00 km	1300,52
					<b>9796,90</b>

(Fonte: elaborado pelas autoras)

Uma premissa deste estudo é que todos os métodos de reforço resistirão, sem a necessidade de manutenção, pelo mesmo período de tempo estipulado para a sua vida útil, 50 anos. Esta simplificação parte da premissa que todas as opções de reforço somente terão manutenção efetuada com reforços na parte superior de seu tabuleiro, ou seja, apenas o recapeamento e troca de asfalto. Esta premissa foi adotada com base no histórico nacional de manutenção deficiente das obras de arte brasileiras.

#### Análise do inventário

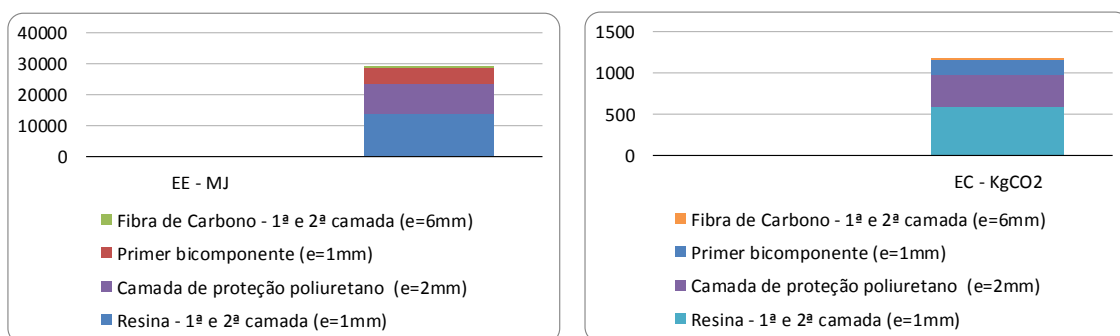
Para a análise do inventário foram verificados os indicadores de Carbono e Energia Incorporados em cada um dos sistemas, conforme apresentado no próximo item. Estes indicadores expressam as quantidades de energia consumida e carbono emitido na extração e produção dos materiais que compõem as alternativas estudadas.

### Apresentação e discussão dos resultados

A partir da AICV efetuado foram obtidos os quantitativos de energia e carbono incorporados em cada material componente dos diferentes reforços estudados, conforme verificado nos itens a seguir.

#### Fibra de carbono

Na Figura 3 é possível observar os valores de energia e de carbono incorporado total para o reforço. Os valores de carbono incorporado total para o reforço utilizando fibra carbono, além das parcelas de consumo de cada material que compõe o sistema. O comportamento se mostra similar para os dois cenários analisados, as resinas são a maior fonte tanto de energia quanto de carbono incorporados nesse sistema. É válido ressaltar que os dados coletados para a fibra de carbono não são da mesma base que os demais, o que pode agregar incerteza à análise.

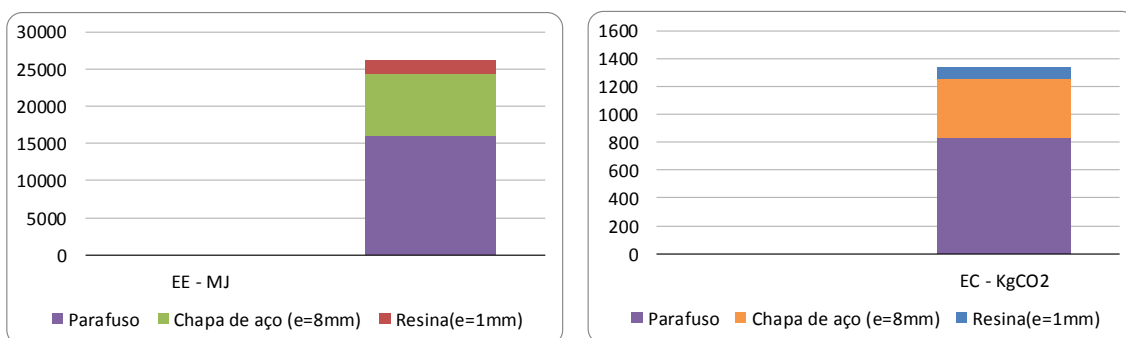


(Fonte: elaborado pelas autoras)

**Figura 3 - Resultados da avaliação da energia e carbono incorporado no reforço com fibra carbono.**

#### Chapa de aço

Os valores obtidos na análise da energia e carbono incorporados para a alternativa de reforço com chapa de aço estão apresentados na Figura 4. É percebido nesta análise que os parafusos de fixação do reforço geraram a maior parcela tanto de energia quanto de carbono incorporados ao sistema.

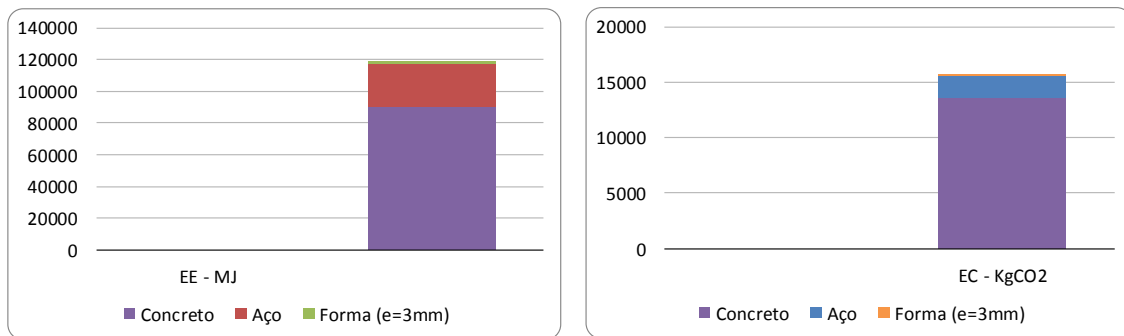


(Fonte: elaborado pelas autoras)

**Figura 4 - Resultados para energia e carbono incorporado para reforço com chapa colada.**

#### Aumento de seção - execução convencional

Os resultados obtidos a partir da avaliação da energia e carbono incorporados ao sistema de aumento de seção convencional podem ser visualizados na Figura 5. Conforme esperado, o valor tanto de carbono quanto de energia incorporados ao concreto são muito superiores aos demais componentes.

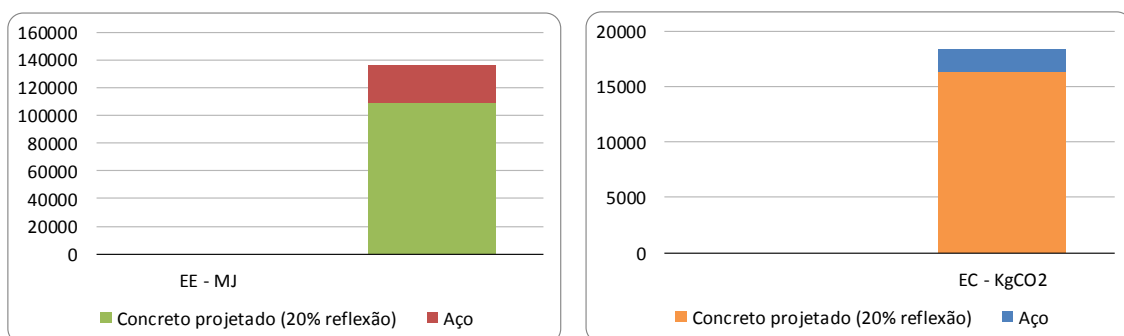


(Fonte: elaborado pelas autoras)

**Figura 5 - Resultados para energia e carbono incorporada para reforço com aumento de seção e execução convencional.**

#### Aumento de seção - concreto projetado

Os resultados da avaliação da energia e carbono incorporados ao sistema de aumento de seção com concreto projetado são apresentados na Figura 6. É percebido comportamento semelhante ao do reforço com aumento de seção convencional, em que o concreto se mostra o maior detentor tanto de energia quanto de carbono incorporados.



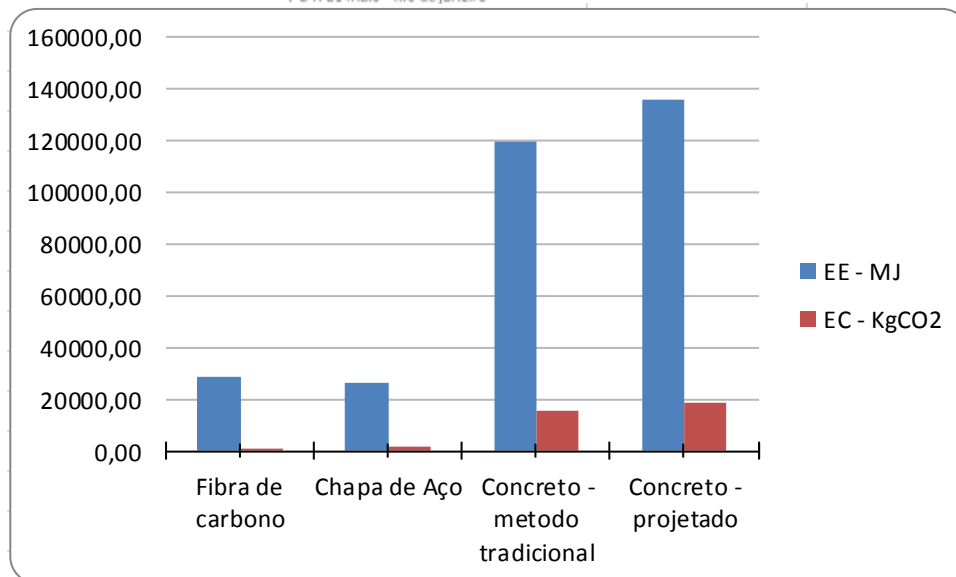
(Fonte: elaborado pelas autoras)

**Figura 6 - Resultados para energia e carbono incorporado de reforço com aumento de seção e execução com concreto projetado.**

#### Energia e Carbono incorporados para todas as alternativas estudadas

Uma comparação entre as diferentes opções de reforço estudadas é apresentada na Figura 7, na qual fica evidente o considerável montante de energia e carbono incorporados ao concreto, enquanto que as soluções que não utilizam este material apresentam valores muito inferiores.





(Fonte: elaborado pelas autoras)

**Figura 7 - Comparativo de energia e carbono incorporados para cada alternativa de reforço estudada.**

### Considerações finais

O presente estudo, mesmo com suas limitações, oferece uma oportunidade de visualização das diferenças nas quantidades de carbono e energia incorporados às opções de reforço estrutural avaliadas, de maneira muito simples e visual. Entretanto, cabe salientar que os quesitos de desempenho estrutural e econômico também são importantes, sugerindo-se uma avaliação mais profunda destas opções, que combine os dados de desempenho ambiental aos demais quesitos, a fim de se obter um melhor entendimento sobre qual das alternativas oferece melhor equilíbrio entre os desempenhos ambiental, social e econômico. Ainda, sugere-se que a profundidade do estudo seja ampliada, através da identificação dos impactos potenciais associados às opções estudadas, além do levantamento de outros indicadores associados a estes impactos.

Considerando a energia incorporada, ambas as soluções em concreto apresentaram valores aproximadamente cinco vezes maiores do que os obtidos para a fibra de carbono. Entre os concretos, a maior energia incorporada foi verificada para a opção com concreto projetado, devido ao alto índice de reflexão que causa elevada taxa de desperdício e geração de resíduos. A mesma relação de resultados foi observada para as quantidades de carbono incorporado.

Se analisarmos o momento de transporte (transporte\*distância), embora a fibra de carbono seja adquirida em São Paulo, os materiais para a realização de um reforço estrutural deste tipo possuem quantidades muito menores quando comparados à demanda de material dos outros métodos estudados. Por este motivo a influência das emissões relativas ao transporte mantêm-se baixas para esta opção.

Os tempos de execução dos reforços com fibra de carbono e chapa de aço são consideravelmente menores do que o tempo necessário para a execução de um aumento de seção tanto com o método tradicional quanto com o uso de concreto projetado. Assim o tempo de canteiro de obra necessário para a execução daqueles reforços é



consideravelmente menor, assim como a quantidade de funcionários necessários à execução. Outra característica dos reforços executados com fibra de carbono e chapa de aço é que eles introduzem cargas menores às fundações, contribuindo para uma melhor manutenção da vida útil das mesmas.

### Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7188/1984 - Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.
- \_\_\_\_\_. NBR 6118/2014 – Projeto de Estrutura de Concreto Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.
- \_\_\_\_\_. NBR 7188/2013 – Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e Outras Estruturas. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.
- \_\_\_\_\_. NBR 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura
- \_\_\_\_\_. NBR 14044 - Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações
- ASHBY, M. F. Materials and the environment: eco-informed material choice. 2. ed. Whaltam/USA: Elsevier Inc., 2013.
- CASTRE, C. Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão - Potencialidade e limitações. Congresso Latino americano REHABEND, 10p. Santander, 2014.
- CHRISTENSEN J. B.; GILSTRAP J.; DOLAN C.W. Composite Materials reinforcement of existing masonry walls. Journal of Architectural Engineering, p. 63-70, 1996.
- DNIT. IPR 709 - Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias. 2004. 253p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/manuais/documentos/709\\_manual\\_de\\_inspecao\\_de\\_pontes\\_rodoviarias.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/manuais/documentos/709_manual_de_inspecao_de_pontes_rodoviarias.pdf)> Acesso em: 03 nov. 2017.
- HAMILTON, H. R.; DOLAN C. W. Durability of FRP reinforcements for concrete. Prog. Struct. Engng Mater 2, p. 139-145, Wyoming, 2000.
- HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. (2008) Embodied energy and carbon in construction materials. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v.161, n.2, p. 87-98, 2008.
- HELENE, Paulo. Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto, São Paulo: Pini, 1992.
- NPER. Normas para Projeto de Estradas de Rodagem, NPER, 1949.
- PALIGA, C. M. Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 249p. Porto Alegre, 2008.
- REIS, L. S. N. Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 114p. Belo Horizonte, 2001.
- SANTOS, Paulo Mascarenhas. Comparação de reforço com chapas de aço e fibras de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples. 2008. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia) - Departamento de Tecnologia curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, 2008.
- SOUDKI, K.; ALKHRDAJI, T., 2005. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems. Structures Congress, 8p. 2005.