

CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO₂ DE BARRAS DE BFRP, GFRP E AÇO: ESTUDO DE CASO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

DUARTE, Isabela (1); SANTOS, Jakeline (1); FUGIYAMA, Michele (1); PIMENTEL, Lia (2); FORTI, Nádia (2)

(1) Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, isabela.od1@puccampinas.edu.br; jakeline.ds1@puccampinas.edu.br; michele.mf1@puccampinas.edu.br

(2) Pontifícia Universidade Católica de Campinas, lialp@puc-campinas.edu.br

Resumo: *Esse trabalho teve como objetivo fazer um estudo do estado da arte de avaliações do ciclo de vida de barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) e Polímero Reforçado com Fibras de Basalto (BFRP), comparando-as com barras de aço. Foram consideradas avaliações do berço ao portão, com foco em emissão de CO₂ e consumo energético, obtidas da literatura. Os dados coletados foram aplicados em um estudo de caso, de vigas de concreto armado com barras dos diferentes materiais, a fim de definir o material com o melhor desempenho ambiental para uma mesma configuração de armadura. Os resultados mostraram um decréscimo significativo em relação ao peso da armadura de aço, com uma redução de 73,51% quando empregadas barras de GFRP, e 74,40% para barras de BFRP. Este decréscimo contribuiu para o melhor desempenho ambiental das barras de FRP, em que as barras de GFRP e BFRP apresentaram redução de 67,70% e 75,63% na emissão de CO₂, respectivamente. Além disso, o consumo energético para a produção das barras de GFRP reduziu 64,31% em relação às barras de aço. Em vista disso, a utilização de barras de FRP se mostrou uma alternativa sustentável ao uso do material convencional aço.*

Palavras-chave: *Avaliação do ciclo de vida, Materiais de Construção, GFRP, BFRP, Aço.*

Área do Conhecimento: *Área, subgrupo (segundo <http://lattes.cnpq.br/web/dgp/engenharias>), Qualidade e desempenho de produtos e sistemas construtivos.*

1 INTRODUÇÃO

Polímeros reforçados com fibra (FRP) vem sendo utilizado como solução para problemas relacionados a corrosão da armadura (FAKHARIFAR et al., 2016). Os materiais poliméricos caracterizam-se pelas propriedades não magnéticas e não corrosivas, além de uma alta resistência à tração unidirecional e baixo peso específico. A grande maioria das fibras utilizadas na fabricação de barras de FRP são de vidro, carbono e aramida, bem como as fibras de basalto, que são acessíveis industrialmente hoje em dia (JUMAA; YOUSIF, 2019).

Produtos e processos industriais causam impactos que afetam o meio ambiente, podendo ser apenas locais ou globais. Tais impactos, segundo a UNEP (2003), podem ocasionar toxicidade humana, alterações climáticas e destruição da camada de ozônio estratosférico. Além disso, devido aos recursos naturais limitados, altos preços e os impactos ambientais, faz-se necessário uma busca por materiais com melhor desempenho mecânico e menos prejudiciais ao meio ambiente, com baixo custo de produção e manutenção após sua utilização (IŞILDAR; MORSALI; ZAR GARI, 2020; MARCAL et al., 2013)

Dessa forma, as empresas necessitam de maior preocupação com relação a questão ambiental no desempenho de suas atividades. Assim, busca-se ferramentas que contribuam para tomadas de decisões, auxiliando na diminuição de impactos causados por seus produtos e processos, podendo ser utilizado como um diferencial competitivo para sua organização. Uma ferramenta muito utilizada diz respeito a Análise do Ciclo de Vida dos produtos, trazendo melhorias para o meio ambiente e benefícios para as empresas (MARCAL et al., 2013).

A avaliação do ciclo de vida (ACV), segundo a ABNT NBR ISO 14040 (2009), é uma técnica desenvolvida para avaliar os impactos ambientais de produtos, processos e serviços, a fim de melhor compreender e lidar com esses impactos. Essa avaliação abrange os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais, como exemplo, o uso de recursos e as consequências de liberação para o meio ambiente, ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a obtenção das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem, até a disposição final, ou seja, uma análise do berço ao túmulo (cradle-to-grave). A partir dessas análises, é possível identificar as oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental em diferentes etapas do ciclo de vida, contribuindo com o nível de informação para os tomadores de decisão na indústria, nas organizações governamentais e também não-governamentais, além da seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental, que inclui técnicas de medição e marketing (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Neste trabalho será realizado um estudo comparativo para avaliar o desempenho ambiental de barras de aço, Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (GFRP) e Polímero Reforçado com Fibra de Basalto (BFRP), ao serem utilizadas como armadura em uma viga de concreto. Os parâmetros considerados para análise foram: a emissão de CO₂ e o consumo energético da armadura dos diferentes materiais.

2 METODOLOGIA

Com o crescente aumento da conscientização ambiental, surge em paralelo técnicas de avaliação do desempenho ambiental de produtos, serviços e processos. Um método muito empregado é a avaliação do ciclo de vida (ACV), que possui como foco avaliar os impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de um produto, com o princípio do berço ao túmulo (ABNT 14040, 2014).

Neste trabalho, a metodologia empregada consiste em um estudo sobre o estado da arte de avaliações do ciclo de vida de barra de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) e Polímero Reforçado com Fibras de Basalto (BFRP) em comparação ao aço. Por meio de uma revisão bibliográfica, serão coletados dados sobre o consumo energético e emissões de CO₂ do processo produtivo das barras de GFRP, BFRP e aço. Em uma segunda etapa os dados obtidos serão utilizados para um estudo de caso com armaduras de GFRP, BFRP e aço, no qual será avaliado, o material que apresenta o melhor desempenho ambiental para uma mesma configuração de armadura.

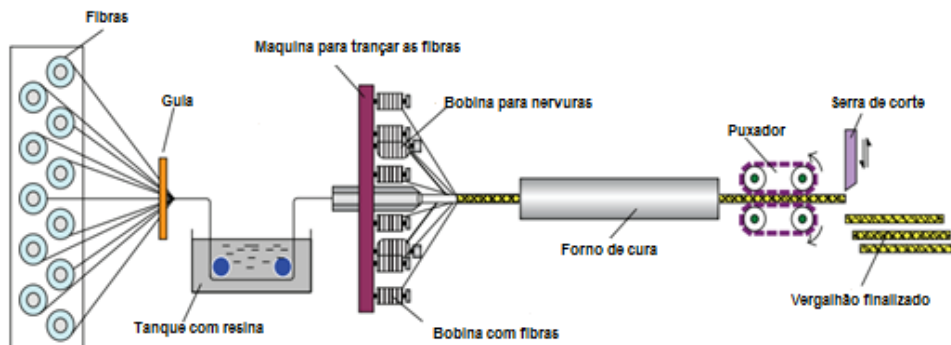
3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE BARRAS DE FRP

Os FRP são um material compósito de fibras envolta em uma matriz polimérica. São comumente produzidos por diferentes tipos de fibras, sendo as mais utilizadas carbono (CFRP), vidro (GFRP), aramida (AFRP) e atualmente basalto (BFRP). As barras de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) são utilizadas como reforço estrutural em elementos de concreto armado. Entre as principais características do GFRP destacam-se suas propriedades não magnéticas e não corrosivas (NANNI; DE LUCA; JAWAHERI ZADEH, 2014), que permitem que o material seja utilizado em substituição ao aço em estruturas presentes em ambientes agressivos, como regiões de maresia. O basalto é um material natural formada pelas rochas vulcânicas, originadas do resfriamento e solidificação do magma sobre a superfície terrestre. Seu estado é fortemente influenciado pela taxa de temperatura do processo de têmpera que leva a uma cristalização mais ou menos completa (FIORE et al., 2015).

O uso de novos materiais também traz a preocupação com os impactos ambientais associados à sua produção, uso e descarte. Para analisar os impactos causados pelo uso das barras de FRP pode-se utilizar ferramentas como a Avaliação de ciclo de vida (ACV). No processo de desenvolvimento da avaliação do ciclo de vida (ACV) é necessário compreender as etapas de produção do material que a ser avaliado.

As barras de FRP são fabricadas pelo método de produção por pultrusão, que combina tração com extrusão. No processo as fibras são estiradas e passam por um banho de resina, depois são modeladas e aquecidas por um forno para o seu processo de cura. No fim do processo a barra são cortadas formando os vergalhões (UOMOTO et al., 2002; YOU et al., 2015). A Figura 1, representa as etapas de produção de barras de FRP.

Figura 1 - Processo de produção das barras de FRP



Fonte: YOU et al. (2015 – Adaptado)

Com o conhecimento do processo de produção da barra de FRP é possível, por meio de uma ACV Cradle-to-gate (berço ao portão), determinar os níveis de emissão de CO₂ e o consumo energético resultante do processo produtivo de vergalhões de GFRP.

Ozcoban et al. (2017) realizou um estudo comparativo entre uma construção em concreto armado com aço e concreto armado com barras de FRP (GFRP, BFRP e CFRP, juntos na mesma estrutura). Os dados obtidos pelo autor, para a fase de fabricação de emissão de CO₂ das barras de GFRP e consumo energético são 3,33 kg.CO₂/kg e 47,16 MJ/kg respectivamente, totalizando 130,5 kg.CO₂ e 1841,80 MJ. A armadura de aço apresentou valores para emissão de CO₂ de 15613,28 kg.CO₂ e consumo energético de 212061,02 MJ. Quando comparamos a emissão de CO₂ dos materiais por kg de material, as barras de GFRP possuem valores superiores ao aço (2,68 kg.CO₂/kg), contudo, por se tratar de um material mais leve, o resultado final é positivo para o uso do GFRP.

No estudo de Inman et. al (2017) foi realizado a análise do ciclo de vida para avaliar os impactos ambientais de armaduras de BFRP e armadura convencional de aço nas vigas de concreto. A análise comparativa foi realizada de acordo com a ISO 14040:2006 e EN 15804:2012. A unidade funcional (FU) é definida como 'por viga de concreto armado'. A avaliação cradle-to-gate (berço ao portão) foi usada, em que são considerados desde a extração e processamento de matéria prima, processamento de entrada de material secundário, transporte para o fabricante e fabricação como parte da fase do produto. O estágio de uso não foi avaliado, visto que as emissões devem ser próximas de zero, assim como o final de vida útil, pois se espera que a vida útil estimada das vigas seja superior a 60 anos.

Os resultados da ACV mostram que as vigas reforçadas com BFRP de 1200 mm tem melhor desempenho em todos os dezoito indicadores ambientais em comparação com a viga de concreto armado de aço de 1250 mm. A viga armada com BFRP apresenta 14,7 kg.CO₂eq/FU de emissões de alterações climáticas, enquanto a viga com aço mostra quase o dobro da quantidade de emissões incorporadas em 23,7 kgCO₂eq / FU.

Observou-se que os conjuntos de dados do BFRP e do aço possuem fatores de emissões semelhantes, 2,6 e 2,34 kgCO₂eq/kg, respectivamente. No entanto, devido ao peso específico inferior do BFRP, sendo três vezes mais leve que o aço, as emissões gerais incorporadas são muito menores em vigas de concreto armado com barras de BFRP. Nessas vigas, o maior contribuinte para as emissões foi o concreto (93,7%), seguido pela resina (5,5%), consumo de eletricidade do forno (0,4%), mineração e transporte (0,4%). Já para vigas de concreto armado com barras de aço, com aço, o maior contribuinte para as emissões foi o concreto (56,2%), seguido do aço (43,8%).

Quando considerado sem o concreto, os resultados de barras de BFRP no GWP (Global Warming Potential – Potencial de Aquecimento Global) apresentam que o maior contribuinte para as emissões incorporadas foi a resina (86,8%), seguido pelo consumo de eletricidade do forno (6,7%), mineração (6,3%) e transporte (0,1%). Foi verificado que a resina epóxi possui fator de emissão de 6,73 kgCO₂eq / kg. Em contrapartida, a resina de poliéster tem um fator de emissão de 7,64 kgCO₂eq / kg, enquanto os produtos químicos orgânicos emitem 1,99 kgCO₂eq / kg. Essa faixa de fatores de emissão resultou em valores de GWP para barras de BFRP variando de

0,9 a 2,6 kgCO₂eq / kg. Quando a quantidade de resina foi ajustada de 20 a 40%, as emissões de GWP variaram de 1,67 a 2,98 kgCO₂eq / kg.

Esse estudo destaca que polímeros reforçados com fibra de basalto apresenta-se como material de construção vantajoso e mais especificamente benéfico como material de reforço em vigas de concreto.

4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE BARRAS DE AÇO

. Devido à baixa resistência à tração do concreto simples, são utilizadas barras de aço, obtendo-se assim o concreto armado. Além de proporcionar maior resistência à tração, o aço promove ductilidade e aumenta a resistência à compressão, quando inserido em estruturas de concreto (PINHEIRO e GIONGO, 1986).

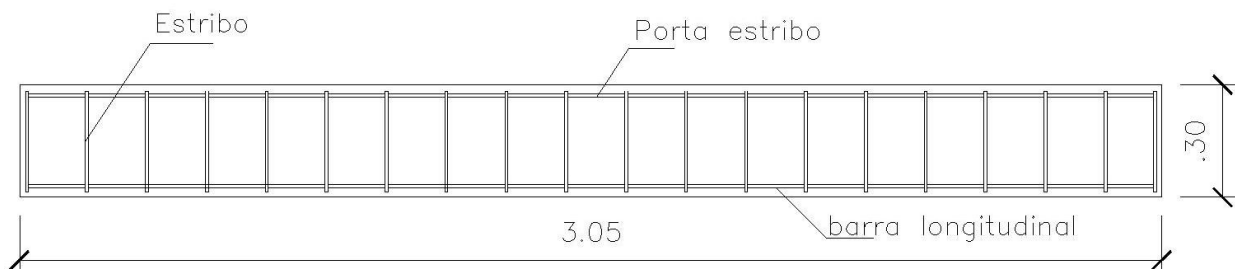
Ainda que o aço seja um material extremamente importante para a sociedade como um todo, existem preocupações quanto aos impactos ambientais decorrentes do seu processo de fabricação. A utilização de recursos naturais não-renováveis em combinação com o alto consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa, indicam a necessidade de uma análise do ciclo de vida do aço, a fim de reduzir os impactos negativos ao meio ambiente.

O estudo realizado por Tavares e Bragança (2016) analisou os índices de CO₂ para materiais de construção em edificações do Brasil. Os dados foram levantados do Balanço Energético Nacional e em relatórios de ministérios e de federações de indústrias. As emissões de Carbono por uso de fontes combustíveis foram adaptadas do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – (IPCC, 2006). Parte do trabalho foi dedicada à análise do processo de produção de barras de aço, obtendo-se valores de 35 MJ/ kg de energia embutida na produção, e 2,73 kg CO₂/kg, referente à emissão de CO₂.

5 ESTUDO DE CASO: EMISSÃO DE CO₂ E CONSUMO ENERGÉTICO DE ARMADURAS DE FRP E AÇO

Com base no levantamento bibliográfico realizado, sobre as emissões de CO₂ e consumo energético dos materiais abordados, podemos realizar um estudo comparativo e avaliar o desempenho ambiental de cada material quando inseridos em um elemento de concreto armado. Nesse estudo avaliaremos a emissão de CO₂ e o consumo energético da armadura de uma viga armada com BFRP, GFRP e aço. A armadura avaliada possui a configuração apresentada na Figura 2, com três barra longitudinais com 10 mm de diâmetro e 300 cm de comprimento, vinte estribos com 8 mm de diâmetro e dimensões 10x25 cm e dois portas estribos com 8 mm de diâmetro e 300 cm de comprimento.

Figura 2 - Modelo da armadura



Para realizar o estudo de caso é necessário conhecer o peso específico de cada material, e assim quantificar o peso de cada armadura. O peso específico das barras de BFRP e GFRP foram obtidos em laboratório com o uso de uma balança hidrostática, na qual foram obtidos o peso seco e submerso do material. A Equação 1 foi utilizada para determinar o peso específico do material.

$$\rho = (\text{massa seca}) / (\text{massa seca} - \text{massa submersa}) \quad (1)$$

A Tabela 1 apresenta o peso específico dos materiais. Para as barras de FRP obtivemos o valor de 2,08 g/cm³ para GFRP e 2,01 g/cm³ para BFRP. O peso específico adotado para as barras de aço foi de 7,85 g/cm³ dado fornecido pela ArcelorMittal Brasil. Com conhecimento dos pesos específicos determinou-se que as armaduras GFRP, BFRP e aço pesavam 3,56 kg, 3,44 kg e 13,44 kg respectivamente. Esses valores

mostraram que o uso de barras de FRP proporcionou um decréscimo significativo no peso da armadura, com uma redução de 73,51% quando empregadas barras de GFRP, e 74,40% para as barras de BFRP.

Tabela 1 - Peso das armaduras de FRP e aço

GFRP	Quant.	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Peso específico (g/cm ³)	Peso (Kg)
Estribo 10x25	20,0	0,8	70,0	0,503	35,186	2,08	1,46
Longitudinal	3,0	1,0	300,0	0,785	235,619	2,08	1,47
Porta estribo	2,0	0,8	300,0	0,503	150,796	2,08	0,63
						Total	3,56
BFRP	Quant.	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Peso específico (g/cm ³)	Peso (Kg)
Estribo 10x25	20,0	0,8	70,0	0,503	35,186	2,01	1,41
Longitudinal	3,0	1,0	300,0	0,785	235,619	2,01	1,42
Porta estribo	2,0	0,8	300,0	0,503	150,796	2,01	0,61
						Total	3,44
AÇO	Quant.	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Peso específico (g/cm ³)	Peso (Kg)
Estribo 10x25	20,0	0,8	70,0	0,503	35,186	7,85	5,52
Longitudinal	3,0	1,0	300,0	0,785	235,619	7,85	5,55
Porta estribo	2,0	0,8	300,0	0,503	150,796	7,85	2,37
						Total	13,44

As referências utilizadas como base de emissão de CO₂ e consumo energético são Ozcoban, E (2017) para as barras de GFRP, Inman et. Al (2017) para barras de BFRP e Tavares e Bragança (2016) para as barras de aço. Todos os autores apresentaram dado com base no peso em kg do material analisado. A Tabela 2 apresenta os valores adotados para o estudo.

Tabela 2 - Referências do estudo

Referências	Emissão de CO ₂	Consumo energético
Ozcoban, E (2017) - GFRP	3,33 kgCO ₂ /kg	47,16 MJ
Inman et. al (2017) - BFRP	2,60 kgCO ₂ /kg	-
Tavares e Bragança (2016) - Aço	2,73 kgCO ₂ /kg	35,00MJ

Utilizando os dados de referência para emissão de CO₂ temos as armaduras de FRP produzindo 11,85 kg.CO₂ quando utilizamos barras de fibra de vidro (GFRP) e 8,94 kg.CO₂ em barras de fibra de basalto (BFRP). Enquanto a armadura de aço apresenta emissões de 36,69 kg.CO₂. Para o consumo energético temos que a armadura de GFRP consome 167,89 MJ e a armadura em aço consome 470,40 MJ. Em ambos os casos as armaduras de FRP foram ambientalmente superiores ao aço, com GFRP e BFRP apresentando respectivamente uma redução de 67,70% e 75,63% na emissão de CO₂, além do consumo energético da armadura de GFRP que reduziu 64,31%.

6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo fazer uma análise do estado da arte de avaliações do ciclo de vida de barras de barra de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (GFRP) e Polímero Reforçado com Fibras de Basalto (BFRP), comparando-as com barras de aço. No estudo foram consideradas avaliações do berço ao portão, com enfoque em emissão de CO₂ e consumo energético, obtidas da revisão bibliográfica. Posteriormente, os dados coletados foram utilizados em um estudo de caso, de vigas de concreto armado com barras dos diferentes materiais, buscando-se assim, definir o material com o melhor desempenho ambiental para uma mesma configuração de armadura.

A utilização de barras de FRP em substituição às barras de aço promoveram um decréscimo significativo no peso da armadura, com uma redução de 73,51% quando empregadas barras de GFRP, e 74,40% para as barras de BFRP. Este decréscimo contribuiu para que as armaduras de FRP apresentassem melhor desempenho ambiental quando comparadas às barras de aço, de modo que as barras de GFRP e BFRP apresentaram redução de 67,70% e 75,63% na emissão de CO₂, respectivamente. Além disso, o consumo energético para a produção das barras de GFRP reduziu 64,31% em relação às barras de aço. Dessa forma, a utilização de barras de FRP se mostrou uma alternativa sustentável ao uso do material convencional aço.

7 REFERÊNCIAS

- FAKHARIFAR, M. et al. Innovative hybrid reinforcement constituting conventional longitudinal steel and FRP stirrups for improved seismic strength and ductility of RC structures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 10, n. 1, p. 44–62, 2016.
- FIGLIORE, V. et al. A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 74, p. 74–94, 2015.
- INMAN, M.; THORHALLSSON, E. R.; AZRAGUE, K. A Mechanical and Environmental Assessment and Comparison of Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP). *Rebar and Steel Rebar in Concrete Beams*. Energy Procedia, v. 111, n. 1876, p. 31–40, 2017.
- ISO 14040: 2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework; 2006.
- JUMAA, G. B.; YOUSIF, A. R. Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. *Construction and Building Materials*, v. 209, p. 77–94, 2019.
- MARCAL, L. M. et al. Fundamentos Da Análise Do Ciclo De Vida. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Anais...2013.
- NANNI, A.; DE LUCA, A.; JAWAHERI ZADEH, H. Reinforced Concrete with FRP Bars. Broken Sound Parkway NW, Suite 30: CRC Press, 2014.
- OZCOBAN, E. Comparison of Reinforced Concrete Bridge and Fiber Reinforced Polymer Bridge Using Life Cycle Assessment. [s.l.] University of Miami, 2017.
- PINHEIRO, L. M., GIONGO, J.S. (1986). Concreto armado: propriedades dos materiais. São Carlos, EESC-USP, Publicação 005 / 86. 79p.
- TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. (2016). Índices de CO₂ para materiais de construção em edificações brasileiras. Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment. SBE16 Brazil & Portugal.
- UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Evaluation of Environmental Impacts in Life Cycle Assessment, 2003.
- UOMOTO, T. et al. Use of Fiber Reinforced Polymer Composites as Reinforcing Material for Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 14, n. 3, p. 191–209, 2002.
- YOU, Y. J. et al. Tensile Strength of GFRP Reinforcing Bars with Hollow Section. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2015, 2015.