

T07

APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA ANÁLISE DE IMPACTOS AMBIENTAIS DE CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Iva Emanuely Pereira Lima ¹, Aline da Silva Ramos Barboza ², Karoline Alves de Melo Moraes ³

RESUMO: O emprego do concreto reforçado com fibras (CRF) vem aumentando gradativamente em escala mundial e vem passando por diversos avanços, no entanto, pouco se conhece sobre os impactos ambientais que a implementação desse tipo de alternativa pode acarretar para o meio ambiente. A partir dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo da análise de ciclo de vida (ACV) de uma amostra de vigas de concreto reforçado com fibras (CRF) com uma amostragem de vigas de concreto convencional (CC). Para isso, empregou-se o CML baseline como método de Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV) e os traços dos concretos foram inseridos no software OpenLCA. Ainda, a fronteira do sistema foi do tipo cradle to gate e utilizou-se como unidades funcionais o m³ de concreto produzido e o m³/MPa de concreto produzido. De acordo com o estudo realizado, verificou-se que, para a análise dos resultados por m³ de concreto, apesar de valores bem similares, o CC apresentou menor potencial causador de impactos, no entanto, para a análise do m³/MPa de concreto produzido, o CRF apresentou melhor desempenho. Sendo assim, verificou-se que, mesmos com os gastos relacionados ao transporte da fibra, há um balanço positivo na produção do CRF. Isso mostra que, quando a resistência à compressão foi acrescentada como indicador de desempenho, o CRF apresentou resultados de impactos ambientais mais satisfatórios.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do ciclo de vida; Impactos ambientais; Concreto reforçado com fibras; Concreto convencional.

1. INTRODUÇÃO

O concreto simples apresenta uma baixa capacidade de deformação antes da ruptura, quando submetido à esforços de tração, e os seus elementos rompem-se abruptamente após a abertura da primeira fissura (FIGUEIREDO, 2008). Dessa forma, de acordo com Bentur e Mindess (2007), ao fissurar, a capacidade do concreto de resistir aos esforços de tração é ultrapassada e isso ocorre devido à incapacidade do compósito em interromper a formação de fissuras em sua matriz.

Diante desse comportamento frágil do concreto a esforços de tração, surgiram diversas alternativas tecnológicas para compensar essas limitações, como é o caso da adição de fibras como reforço ao concreto. Sendo assim, os concretos com adição de fibras (CRF) são definidos como compósitos, cujas fases principais são o concreto (matriz) e as fibras, as quais podem ser produzidas a partir de diferentes composições, como aço, vidro, polipropileno, dentre outras (LIAO *et al.*, 2014).

¹ Afiliação: Doutoranda em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFAL
Email: ivaemanuelyl@gmail.com

² Afiliação: Professora Doutora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFAL
Email: aline@lccv.ufal.br

³ Afiliação: Professora Doutora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFAL
Email: kamm@ctec.ufal.br

Em conformidade com Bentur e Mindess (2007), a principal atuação da adição de fibras no concreto é no estágio pós-fissuração, onde estas inibem a progressão das fissuras, garantindo que, mesmo após a fissuração do compósito, haja uma capacidade resistiva que restringe a ruptura brusca do material. Dessa forma, essa ruptura brusca é evitada porque as fibras agem como pontes de transferência de tensões entre as fissuras, o que pode aumentar a energia associada à ruptura do material (BENTUR; MINDESS, 2007; LIAO *et al.*, 2014).

Em consequência das características, o emprego do CRF vem aumentando gradativamente em escala mundial e vem passando por diversos avanços. A partir disso, a utilização desse tipo de concreto com finalidade estrutural vem se consolidando ao longo dos últimos 15 anos, no entanto, pouco se sabe sobre os impactos ambientais que a implementação desse tipo de alternativa tecnológica pode acarretar para o meio ambiente (DI PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013).

Dessa forma, com o intuito de analisar os impactos ambientais causados pela utilização do CRF, pode-se fazer uma análise desses impactos a partir de uma avaliação de ciclo de vida (ACV), onde a ACV é uma técnica para avaliar os potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto/serviço (ABNT, 2009a). Com base nisso, de acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a análise do ciclo de vida pode ajudar, por exemplo, na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos/serviços em vários pontos de seu ciclo de vida.

A partir dessa problemática, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo da análise de ciclo de vida (ACV) de uma amostra de vigas de concreto reforçado com fibras (CRF) com uma amostragem de vigas de concreto convencional (CC), onde ambos os compósitos foram produzidos para posterior aplicação estrutural. Isso posto, pretende-se com esse estudo avaliar os impactos ambientais que a implementação do CRF pode acarretar para o meio ambiente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto Reforçado com Fibras

De acordo com Bentur e Mindess (2007), a principal atuação da adição de fibras no concreto é no estágio pós-fissuração, onde as fibras diminuem o nível de fissuração e deformação da matriz. Dessa forma, no momento de ruptura da matriz, o compósito com a adição das fibras passa a apresentar um nível de tensão muito alto, fazendo com que a energia necessária para o colapso do concreto aumente, tornando melhor o seu desempenho mecânico (FIGUEIREDO, 2008).

Ainda se tratando das características do CRF, pode-se verificar que o uso de fibras implica em uma redução na exsudação do concreto, isso porque foi constatado que concretos reforçados com 0,10% de fibras apresentaram redução de 55% na exsudação, quando comparados aos concretos sem fibras (FIGUEIREDO, 2008). Assim, a adição de fibra no concreto atenua o processo de exsudação no estado fresco e propicia aumento da tenacidade e resistência residual (BENTUR; MINDESS, 2007).

A partir disso, o comportamento estrutural do CRF é normalmente caracterizado por meio de ensaios que definem parâmetros relacionados ao estado pós fissuração. À vista disso, a caracterização do CRF (para caracterização estrutural) pode ser realizada por meio de ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos, como o regido pela norma EN 14651 (CEN, 2007). Diante disso, e sabendo que o *fib* Model Code 2010 (FIB, 2013) e o ACI 544.8R (ACI, 2016), que são atualmente os códigos mais abrangentes sobre estruturas de CRF, recomendam o ensaio de flexão a três pontos regido pela norma EN 14651 (CEN, 2007), pode-se utilizar este ensaio como parâmetro.

Além disso, a NBR 16940 (ABNT, 2021) também recomenda este mesmo ensaio para caracterização do CRF.

2.2 Avaliação do Ciclo de Vida

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma técnica para avaliar impactos e aspectos ambientais associados a um produto mediante a compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. A partir disso, um estudo de ACV é composto por quatro etapas: a fase de definição de objetivo e escopo, a fase de análise de inventário de ciclo de vida, a fase de avaliação de impactos e a fase de interpretação de resultados (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

Em relação à definição de objetivo e escopo, que consiste na primeira etapa de ACV, essa fase deve ser consistente com a aplicação pretendida. Dessa forma, dentro do objetivo, devem estar definidos a aplicação pretendida, as razões para realização do estudo, o público-alvo e a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas. Já o escopo, deve abordar os aspectos relativos ao sistema, as funções dos sistemas de produto, a unidade funcional, a fronteira do sistema, o método de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), dentre outros aspectos (ABNT, 2009b).

Ao que se refere à segunda etapa da ACV, que é a fase de análise de inventário de ciclo de vida (AICV), essa avaliação envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto (ABNT, 2009a). Para auxiliar nessa etapa, foram desenvolvidos *softwares*, como por exemplo o OpenLCA, que atuam na ACV como facilitadores e auxiliam na interpretação das informações (GONZAGA, 2019).

Em relação à terceira etapa da ACV, que é a fase de avaliação de impactos, esta é dirigida à avaliação da significância de impactos ambientais potenciais, usando os resultados da AICV. Em geral, este processo envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreender estes impactos. Isso significa que, nessa fase, na tentativa de compreender os impactos avaliados, os dados coletados no inventário de ciclo de vida (etapa anterior) são agrupados em categorias de impacto específicas (ABNT, 2009b).

Ao que está relacionado com a quarta e última etapa da ACV, que é a fase de interpretação de resultados, é nessa etapa que os resultados obtidos no inventário de ciclo de vida e na avaliação de impacto são combinados e relacionados com o objetivo e o escopo do estudo, identificando as principais fases do ciclo de vida do sistema de produto que contribuem para os impactos ambientais, auxiliando nas tomadas de decisão e na comparação de sistemas diferentes (ABNT, 2009b).

3. METODOLOGIA

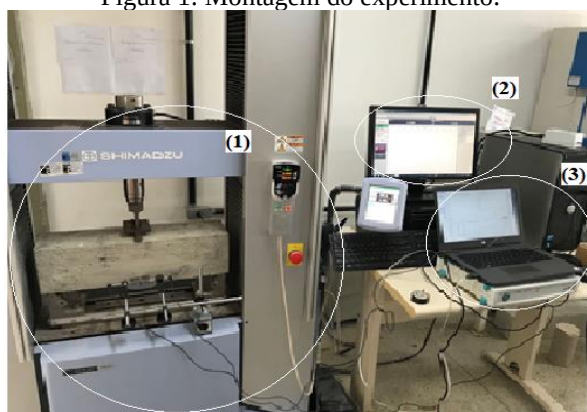
3.1 Descrição dos Materiais

A matriz utilizada na produção dos concretos é composta dos seguintes materiais: agregado miúdo, agregado graúdo, cimento CP V ARI RS, adição mineral (RBMG – Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito), água, e aditivo superplastificante. O agregado miúdo empregado foi a areia fina, que apresenta módulo de finura correspondente a 2,10 e $D_{máx} = 2,36$ mm, e o agregado graúdo foi a pedra britada, que apresenta $D_{máx} = 9,50$ mm. Ao que refere-se ao reforço do CRF, utilizou-se fibras poliméricas, que apresentam módulo de elasticidade longitudinal equivalente a 9,50 GPa e resistência à tração de 600 – 650 MPa. Utilizou-se um teor volumétrico de fibras de 1,0%.

3.2 Caracterização Mecânica do CRF

A caracterização mecânica para avaliação do CRF ocorreu por meio da aplicação do ensaio de flexão a três pontos, normatizado pela EN 14651 (CEN, 2007). Para a aplicação deste ensaio, foram utilizados corpos de prova prismáticos de dimensões $150 \times 150 \times 550$ mm, com vão de ensaio de 500 mm. Assim, para a aplicação desse ensaio, utilizou-se a máquina universal de ensaio Shimadzu, onde o *script* do ensaio foi previamente configurado no *software* Trapezium X (Figura 1).

Figura 1: Montagem do experimento.



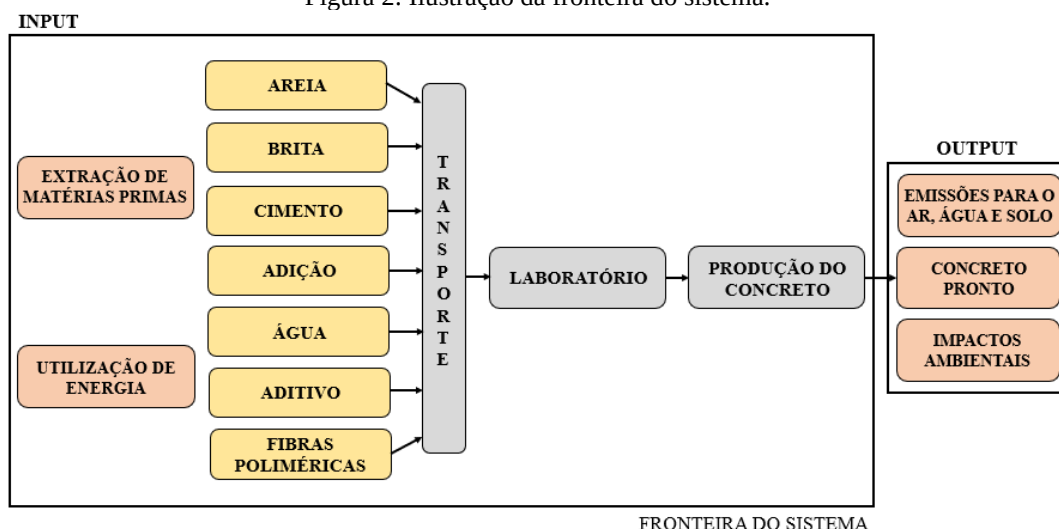
A partir da Figura 1, pode-se observar o esquema que representa a montagem do experimento, em que (1) mostra a máquina universal de ensaio Shimadzu em conjunto com o corpo de prova e LVDTs posicionados, (2) exhibe o computador que apresenta o *software* Trapezium X e (3) exhibe o sistema de aquisição *Spider 8* juntamente com o computador que apresenta o *software* ITOM. Diante do exposto, em síntese, esse ensaio determina a resistência à tração na flexão residual e pode ser utilizado de forma confiável para calcular a resistência a ser considerada no projeto.

3.3 Definição de Objetivo e Escopo da ACV

A partir da análise de ciclo de vida apresentada nesse trabalho, tem-se o objetivo de avaliar de forma comparativa o desempenho ambiental de uma amostra de vigas de CRF com uma amostragem de vigas de CC, onde a partir disso, pretende-se identificar a alternativa ambientalmente mais vantajosa. Além disso, o público-alvo para esta ACV é a comunidade técnica e científica que atua nas linhas de pesquisa sobre concretos reforçados com fibras e concretos especiais, empresas do setor da construção civil e demais interessados sobre o tema.

Ao que se refere ao escopo do estudo, utilizou-se como unidades funcionais o m^3 de concreto produzido e o m^3/MPa de concreto produzido, e a fronteira do sistema foi do tipo *cradle to gate* (do berço ao portão), onde foram considerados os impactos desde a extração das matérias-primas até a fabricação do produto final. Sendo assim, os limites considerados foram: os impactos da areia, da brita e do cimento foram desde a extração de suas matérias-primas até a produção e transporte ao destino final, os impactos da adição mineral foram desde o beneficiamento até a produção e transporte ao destino final, e os impactos do aditivo e das fibras foram apenas pelo transporte ao destino final, pois não se tinha acesso às informações de fabricação. Como forma de ilustração, a Figura 2 ilustra a fronteira do sistema e os fluxos envolvidos na produção dos concretos estudados.

Figura 2: Ilustração da fronteira do sistema.



FRONTEIRA DO SISTEMA

Dando continuidade, o método de AICV escolhido foi o CML *baseline*, cujas categorias de impacto são: acidificação (AP), mudanças climáticas (GWP100), depleção de recursos abióticos (ADP), depleção de recursos abióticos - combustíveis fósseis (ADP-ff), eutrofização (EP), ecotoxicidade em águas doces (FAETP), toxicidade humana (HTP), ecotoxicidade marinha (MAETP), depleção do ozônio estratosférico (ODP), formação de foto-oxidantes (POCP) e ecotoxicidade terrestre (TETP). Ademais, os traços dos concretos foram inseridos no *software* OpenLCA.

Ainda, o local de produção dos concretos foi o Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas, localizado em Maceió – Alagoas. A partir disso, fez-se o levantamento das distâncias aproximadas dos locais de produção e aquisição dos materiais presentes nos traços dos concretos até o destino final (Tabela 1).

Tabela 1: Distância de transporte dos materiais utilizados na confecção dos concretos.

Material	Classificação	Local de obtenção	Distância (km)
Areia (dragagem do rio)	Produto	Rio Mundaú	91
Brita (rochas graníticas)	Produto	Rio Largo – AL	14
Cimento (CP V ARI RS)	Produto	São Miguel dos Campos – AL	58
Adição mineral (RBMG)	Resíduo	Antares	7,5
Aditivo superplastificante	Produto	São Bernardo do Campo – SP	2463
Fibras poliméricas	Produto	Sorocaba – SP	2553
Água	Produto	Rede de abastecimento	0

3.4 Análise de Inventário de Ciclo de Vida (AICV)

Após a definição de objetivo e escopo do trabalho, iniciou-se a fase de análise de inventário de ciclo de vida (AICV), onde essa etapa envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Sendo assim, inicialmente, formulou-se os traços de 1 m³ de concreto para os dois produtos analisados (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2: Traço para confecção do concreto convencional (CC).

a/c	Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Aditivo superplastificante (kg/m ³)	Adição mineral (kg/m ³)	Água (kg/m ³)
0,50	377,90	774,53	813,75	6,30	188,95	188,91

Tabela 3: Traço para confecção do concreto reforçado com fibras (CRF).

a/c	Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Aditivo superplastificante (kg/m ³)	Adição mineral (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Fibras poliméricas (kg/m ³)
0,53	377,90	774,53	813,75	6,30	188,95	200	3,78

Para a obtenção da adição, realizou-se o beneficiamento do resíduo de mármore e granito no LEMA. Para isso, o material passou por um processo de secagem, sendo então destorroado e seco em estufa. No entanto, devido à falta de informações sobre o consumo de energia dos equipamentos usados, os impactos se resumiram ao consumo de energia para a secagem em estufa que, segundo Gontijo e Miranda (2012), equivale a 0,00116 kWh (para 23 horas). Ainda, considerou-se os gastos na produção do concreto que, de acordo com Marceau *et al.* (2007), correspondem a 4,11 kWh/m³. Assim, foram criados os sistemas de produtos denominados CC e CRF (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4: Inventário do ciclo de vida do concreto convencional (CC) por m³.

Material	Montagem do material no software	Quantidade	Fonte	Base de dados
Agregado miúdo (areia)	Sand 0/2	774,53 kg	-	USDA 1.1
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	774,53 kg * 91 km = 70482,23 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Agregado graúdo (brita)	Gravel 2/32	813,75 kg	-	USDA 1.1
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	813,75 kg * 14 km = 11392,5 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Cimento CP V ARI RS	Portland cement (CEM I)	377,90 kg	-	ELCD 3.2
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	377,90 kg * 58 km = 21918,2 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Adição mineral (RBMG)	Electricity mix	0,00116 kWh	Gontijo e Miranda (2012)	USDA 1.1
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	188,95 kg * 7,5 km = 1417,13 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Água	Water, unspecified origin	188,91 kg = 188,91 L	-	USDA 1.1
Aditivo superplastificante	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	6,3 kg * 2463 km = 15516,9 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Consumo energético para concretagem	Electricity mix	4,11 kWh	Marceau <i>et al.</i> (2007)	USDA 1.1

Tabela 5: Inventário do ciclo de vida do concreto reforçado com fibras (CRF) por m³.

Material	Montagem do material no software	Quantidade	Fonte	Base de dados
Agregado miúdo (areia)	Sand 0/2	774,53 kg	-	USDA 1.1
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	774,53 kg * 91 km = 70482,23 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Agregado graúdo (brita)	Gravel 2/32	813,75 kg	-	USDA 1.1
	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	813,75 kg * 14 km = 11392,5 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Cimento CP V ARI RS	Portland cement (CEM I)	377,90 kg	-	ELCD 3.2
	Transport, lorry 3.5-	377,90 kg * 58 km =	Google Maps	USDA 1.1

Adição mineral (RBMG)	16t, fleet average	21918,2 kg*km	Gontijo e Miranda (2012)	USDA 1.1
	Electricity mix	0,00116 kWh		
Água	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	188,95 kg * 7,5 km = 1417,13 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
	Water, unspecified origin	200 kg = 200 L		
Aditivo superplastificante	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	6,3 kg * 2463 km = 15516,9 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Fibras poliméricas	Transport, lorry 3.5-16t, fleet average	3,78 kg * 2553 km = 9650,34 kg*km	Google Maps	USDA 1.1
Consumo energético para concretagem	Electricity mix	4,11 kWh	Marceau <i>et al.</i> (2007)	USDA 1.1

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a avaliação de impacto de ciclo de vida dos concretos, fez-se a modelagem para o CC e CRF no OpenLCA, como pode ser visto na Figura 3. De forma a proporcionar uma melhor compreensão, os resultados foram divididos da seguinte forma: avaliação dos impactos por m³ de concreto (Tabela 6 e Figura 4) e avaliação dos impactos por m³/MPa de concreto (Tabela 7 e Figura 5).

Figura 3: Montagem no software OpenLCA de 1 m³ do CC e de 1 m³ do CRF, respectivamente.

P Inputs/Outputs: Produção do concreto convencional

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data quali...	Descript...
F ₂ sand 0/2	Materials production/...	774.53000	kg		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	7.04822E4	kg*km		none				
F ₂ gravel 2/32	Materials production/...	813.75000	kg		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	1.13925E4	kg*km		none				
F ₂ portland cement (CEM I)	Materials production/...	377.90000	kg		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	2.19182E4	kg*km		none				
F ₂ electricity mix	Energy carriers and te...	0.00116	kWh		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	1417.13000	kg*km		none				
F ₂ Water, unspecified origin	Resource/in water	188.91000	L		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	1.55169E4	kg*km		none				
F ₂ electricity mix	Energy carriers and te...	4.11000	kWh		none				

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided p...	Provider	Data quali...	Descript...
F ₂ CC		1.00000	m³		none				

P Inputs/Outputs: Produção de concreto reforçado

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data quali...	Descript...
F ₂ sand 0/2	Materials production/...	774.53000	kg		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	7.04822E4	kg*km		none				
F ₂ gravel 2/32	Materials production/...	813.75000	kg		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	1.13925E4	kg*km		none				
F ₂ portland cement (CEM I)	Materials production/...	377.90000	kg		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	2.19182E4	kg*km		none				
F ₂ electricity mix	Energy carriers and te...	0.00116	kWh		none				
F ₂ Water, unspecified origin	Resource/in water	200.00000	L		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	1.55169E4	kg*km		none				
F ₂ Transport, lorry 3.5-16t, fleet ...	Transportation and W...	9650.34000	kg*km		none				
F ₂ electricity mix	Energy carriers and te...	4.11000	kWh		none				

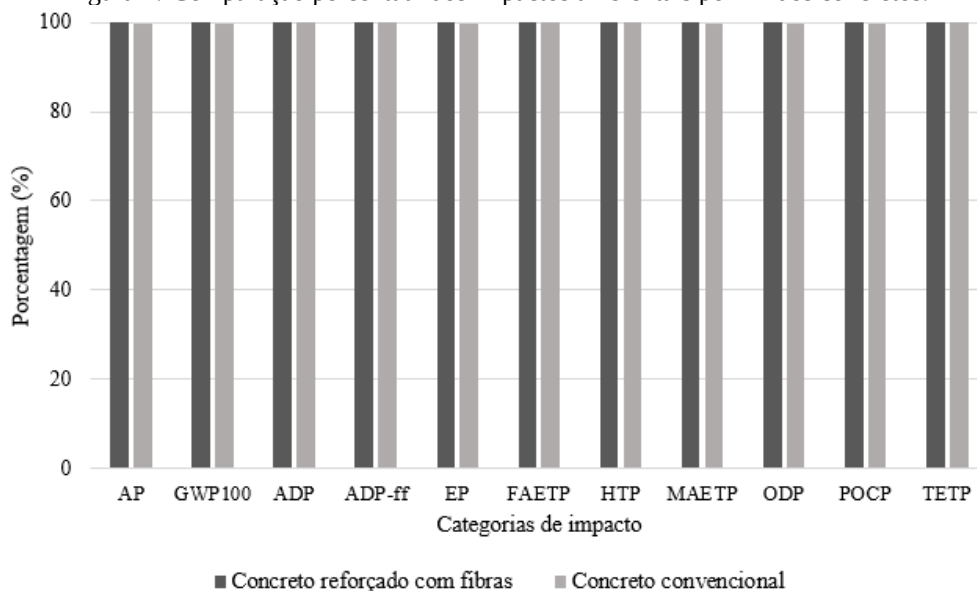
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided p...	Provider	Data quali...	Descript...
F ₂ CRF		1.00000	m³		none				

Tabela 6: Avaliação dos impactos para produção de 1 m³ de concreto.

Categoria de impacto	Referência unitária	Concreto convencional (CC)	Concreto reforçado com fibras (CRF)	Variação (%)
AP	kg SO ₂ eq.	720,6527659	721,5409057	-0,12
GWP100	kg CO ₂ eq.	117243,0766	117590,4175	-0,30
ADP	kg antimônio eq.	0,429524364	0,429530189	0,00
ADP-ff	MJ	1439254,981	1440634,557	-0,10
EP	kg PO ₄ ⁻³ eq.	77,35697367	77,45868721	-0,13
FAETP	kg 1,4-DC eq.	172,7128293	172,8080932	-0,06
HTP	kg 1,4-DC eq.	22581,1036	22590,89063	-0,04
MAETP	kg 1,4-DC eq.	15371146,74	15395184,03	-0,16
ODP	kg CFC-11 eq.	0,007722602	0,007740976	-0,24
POCP	kg etileno eq.	-38,92749096	-38,86166823	-0,17
TETP	kg 1,4-DC eq.	346,223208	346,5821324	-0,10

A partir dos resultados da Tabela 6, pode-se verificar que os impactos tanto do CC quanto do CRF, para a produção de 1 m³ de concreto, foram bem similares para todas as categorias. No entanto, pode-se observar que o CRF apresentou maior potencial causador de impactos nas onze categorias analisadas, apesar das diferenças terem sido muito pequenas. Ao que corresponde às maiores variações, elas ocorrem para as categorias de mudanças climáticas (GWP100), depleção do ozônio estratosférico (ODP) e formação de foto-oxidantes (POCP), onde esses impactos foram menores para o CC em torno de 0,30%, 0,24% e 0,17%, respectivamente, mostrando que, mesmo para as maiores dispersões, as diferenças ainda podem ser consideradas muito pequenas. Para tentar avaliar essas diferenças visualmente, realizou-se uma comparação percentual dos impactos (Figura 4).

Figura 4: Comparação percentual dos impactos ambientais por m³ dos concretos.



Analisando a Figura 4, pode-se observar visualmente que os impactos tanto do CC quanto do CRF, para a produção de 1 m³ de concreto, foram equivalentes para todas as categorias de impacto analisadas, onde a partir da escala mostrada no gráfico, não é possível verificar diferenças existentes entre a produção dos dois concretos analisados. Essa similaridade pode ser explicada porque a diferença entre os concretos se deu apenas pela modificação da quantidade de água e da adição de

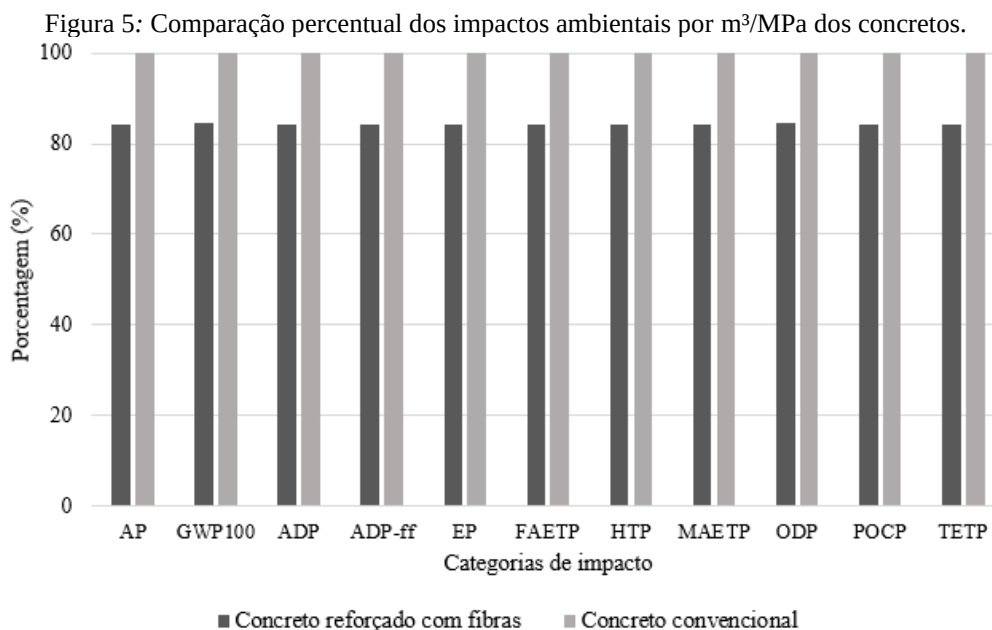
fibras para o CRF, o que mostra que esses aspectos não interferem na análise, quando se considera o m³ de concreto como unidade funcional.

Levando isso em conta, nota-se que, mesmo com os gastos relacionados ao transporte da fibra e com a adição de uma parcela de água na mistura, há um balanço positivo na produção do CRF, apesar desse concreto apresentar maior potencial causador de impactos. Ademais, e com o objetivo de acrescentar um indicador de desempenho mecânico ao estudo, na Tabela 7 está representada a avaliação dos impactos ambientais para produção de 1 m³/MPa de concreto. Para isso, utilizou-se a resistência à compressão do CC e do CRF, que correspondem a 30,43 MPa e 36,12 MPa, respectivamente.

Tabela 7: Avaliação dos impactos para produção de 1 m³/MPa de concreto.

Categoria de impacto	Referência unitária	Concreto convencional (CC)	Concreto reforçado com fibras (CRF)	Variação (%)
AP	kg SO ₂ eq.	23,68231238	19,97621555	+18,55
GWP100	kg CO ₂ eq.	3852,87797	3255,548657	+18,35
ADP	kg antimônio eq.	0,014115161	0,011891755	+18,70
ADP-ff	MJ	47297,23893	39884,67767	+18,58
EP	kg PO ₄ ⁻³ eq.	2,542128612	2,144481927	+18,54
FAETP	kg 1,4-DC eq.	5,675742007	4,784277219	+18,63
HTP	kg 1,4-DC eq.	742,0671575	625,4399398	+18,65
MAETP	kg 1,4-DC eq.	505131,3419	426223,2567	+18,51
ODP	kg CFC-11 eq.	0,000253783	0,000214313	+18,42
POCP	kg etileno eq.	-1,279247156	-1,075904436	+18,90
TETP	kg 1,4-DC eq.	11,37769333	9,595297132	+18,58

A partir dos resultados da Tabela 7, para a produção de 1 m³/MPa de concreto, nota-se que o CC apresentou maior potencial causador de impactos em todas as categorias analisadas. Isso mostra que, ao contrário do constatado na avaliação de impactos para a produção de 1 m³ de concreto, o CC apresentou desempenho inferior em todas as categorias de impacto, quando normalizado pela resistência à compressão aos 28 dias. Ao observar as variações, nota-se que todas as dispersões foram em torno de 18%, onde as maiores ocorrem para as categorias de formação de foto-oxidantes (POCP), depleção de recursos abióticos - reservas finais (ADP) e toxicidade humana (HTP), onde esses impactos foram maiores para o CC em torno de 18,90%, 18,70% e 18,65%, respectivamente, mostrando dispersões maiores, se comparadas com a análise anterior. Para tentar avaliar essas diferenças visualmente, realizou-se uma comparação percentual dos impactos (Figura 5).



Analisando a Figura 5, pode-se observar nitidamente as diferenças existentes entre a produção dos dois concretos analisados. Isso mostra que, quando a resistência à compressão foi acrescentada como indicador de desempenho, o CRF apresentou resultados de impactos ambientais mais satisfatórios do que os apresentados pelo CC, e isto se deve ao fato de que o uso de fibras interfere no desempenho mecânico dos concretos.

A partir disso, quando se considera o m³/MPa de concreto como unidade funcional, verifica-se que a adição de fibras para o CRF interfere diretamente na análise dos impactos avaliados, o que mostra que a fibra é um importante aspecto a ser considerado. Sendo assim, nota-se que, mesmo com os gastos relacionados ao transporte da fibra e com a adição de uma parcela de água na mistura, há um balanço positivo na produção do CRF, uma vez que, para a produção de 1 m³/MPa de concreto, o CC apresentou maior potencial causador de impactos.

5. CONCLUSÕES

De acordo com a investigação feita, verificou-se que os impactos tanto do CC quanto do CRF, para a produção de 1 m³ de concreto, foram bem similares para todas as categorias de impacto. No entanto, observou-se que o CRF apresentou maior potencial causador de impactos, apesar das diferenças terem sido muito pequenas. Sendo assim, essa similaridade pode ser explicada porque a diferença entre os concretos se deu apenas pela modificação da quantidade de água e da adição de fibras para o CRF, o que mostra que esses aspectos não interferem significativamente nessa análise.

Em relação à análise para a produção de 1 m³/MPa de concreto, verificou-se que o CC apresentou maior potencial causador de impactos em todas as categorias de impacto. Isso mostra que, quando a resistência à compressão foi acrescentada como indicador de desempenho, o CRF apresentou resultados de impactos ambientais mais satisfatórios do que os apresentados pelo CC, e isto se deve ao fato de que o uso de fibras interfere no desempenho mecânico dos concretos. A partir disso, verifica-se que a adição de fibras interfere diretamente na análise dos impactos avaliados.

A partir disso, pode-se dizer que o presente trabalho alcançou as metas sugeridas inicialmente, onde foi realizado um estudo comparativo da análise de ciclo de vida de uma amostra de vigas de CRF com uma amostragem de vigas de CC, onde verificou-se que, para esse estudo, mesmo com os gastos relacionados ao transporte da fibra e com a adição de uma parcela de água na mistura, há um balanço positivo na produção do CRF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.8R-16**: Indirect method for obtaining the stress/strain response of fiber-reinforced concrete (FRC). Dubai, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: 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.

_____. **NBR 16940**: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 2 ed. 2007.

DI PRISCO, M.; COLOMBO, M.; DOZIO, D. Fibre-reinforced concrete in FIB Model Code 2010: **Principles, models and test validation**. Structural Concrete. 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651**: Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), London. CEN, 2007.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. **fib model code for concrete structures 2010**. Switzerland, 2013.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. Boletim Técnico, Série BT/PCC/260– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GONTIJO, F. E. K.; MIRANDA, T. A. **Eficiência energética no processo industrial de secagem com o uso de inversores de frequência**. XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Bento Gonçalves, 2012.

GONZAGA, N. L. **Avaliação do ciclo de vida de concretos autoadensáveis leves com e sem agregados reciclados**. Universidade Federal de Alagoas, 2019.

MARCEAU, M. L.; NISBET, M. A.; VANGEEM, M. G. **Life cycle inventory of portland cement concrete**. Portland Cement Association, 2007.