ANÁLISE COMPARATIVA DE EMISSÃO DE CO_2 E CONSUMO DE ENERGIA ENTRE O CONCRETO CONVENCIONAL E O UHPC

SUMITOMO, Guilherme de Souza (1); PIMENTEL, Lia Lorena (2);JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila (3)

(1) Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, guilherme.ss13@puccampinas.edu.com;

(2) Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade, lialp@puc-campinas.edu.br

(3) Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade, anajacintho@puc-campinas.edu.br

Resumo: *A indústria da construção civil é uma das atividades econômicas que geram elevados impactos ambientais, dentre eles grande consumo de recursos naturais e poluição ambiental. O concreto é o produto mais utilizado na construção. O cimento utilizado em sua produção é responsável por um elevado consumo de energia e grande liberação de CO_2. Para atender a demanda de produtos cada vez mais sustentáveis, o concreto de ultra alto desempenho (UHPC) é um tipo especial de concreto que atinge elevada resistência e durabilidade. O objetivo desse trabalho consiste em realizar uma comparação entre o impacto ambiental causados pelo UHPC em relação ao concreto convencional considerando-se as emissões de CO_2 e o consumo de energia gerados na produção dos materiais que constituem estes dois tipos de concreto. Os dados serão obtidos na literatura, relativos a trabalhos de análise de ciclo de vida efetuados. Os resultados mostram que UHPC apresenta um maior consumo de cimento em seu traço e, portanto, gera maiores impactos que o concreto convencional, entretanto, os impactos gerados por unidade de resistência mostram uma situação inversa. Logo, apesar da produção dos materiais do UHPC gerarem maiores emissões de CO2 e consumo de energia, sua contribuição na resistência reflete em maior sustentabilidade em outros quesitos, como menor consumo de material e maior vida útil das estruturas.*

Palavras-chave: *Concreto de ultra alto desempenho, Impacto ambiental, Análise comparativa*

Área do Conhecimento: *Engenharia Civil, Construção Civil (Materiais e Componentes de Construção), Qualidade e desempenho de produtos e sistemas construtivos*

1 INTRODUÇÃO

Desde o final do século XX, a construção civil vem se desenvolvendo para se tornar uma atividade mais econômica, tendo em vista seu enorme consumo de recursos naturais do planeta (cerca de 50%), além de descartar resíduos sólidos no ambiente e emiti gases (BARBOSA et al., 2018; RIGHI et al., 2016).

O concreto é o material mais utilizado na indústria da construção, apresentando uma elevada demanda em todo o mundo. Entretanto, é também um dos que mais geram emissões de gás carbônico, já que seu principal material constituinte é o cimento que em sua produção gera cerca de 5% de emissões globais, além de apresentar um intenso uso de energia (DONG, 2018; PAULA, 2016; SILVA, 2015).

Novos materiais vêm se desenvolvendo para atender as demandas por um produto mais resistente, durável e sustentável. Um exemplo é o concreto de ultra alto desempenho (UHPC), um material cimentício reforçado com fibras, que apresenta em sua composição cimento, aditivos minerais, areia e pó de quartzo, superplastificante e fibras. Em seu estado endurecido, apresenta elevadas propriedades mecânicas e de durabilidade. Como consequência, permite na realização de projetos de estruturas mais leves devido à redução da seção transversal de elementos estruturais comparadas com o concreto convencional, proporcionando assim uma implantação mais econômica e sustentável (AGUERO et al., 2019; DONG, 2018;

STENGEL; SCHIEBL, 2009). Além disso, o uso de adições minerais reativas (sílica ativa, escória de alto forno, CCA) como substituição parcial do cimento, favorece a redução da emissão de CO_2 na atmosfera (ZHONG; WILLE; VIEGAS, 2018).

Um meio utilizado para analisar as novas alternativas de novos materiais sustentáveis é a Análise do Ciclo de Vida (ACV). De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040 (2001) e Souza (2012), a ACV é uma técnica de gestão ambiental utilizada para estudar e avaliar os aspectos ambientais e impactos potenciais referentes a um produto, desde a obtenção de sua matéria prima, processos de produção, uso e disposição por meio de um inventário de entradas e saída (matéria prima, energia, produtos, subprodutos e resíduos).

1.1 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é realizar uma comparação da emissão de CO_2 e do consumo de energia necessária para a produção do concreto convencional e do UHPC.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi realizada uma coleta de dados referentes à emissão de CO_2 e consumo de energia para a produção dos materiais constituintes dos dois tipos de concreto em trabalhos acadêmicos e em declaração ambiental do produto (do ingles Enviromental Product Declaration, EPD). Os dados para o concreto convencional são apresentados na Tabela 1 e para o UHPC na Tabela 2.

Tabela 1 - Emissão de CO_2 eq. e consumo de energia dos materiais constituintes do concreto convencional

Material	GWD (kg CO2-eq. / kg material)	ADP (MJ / kg material)	Referência
Cimento Portland (CP V - ARI)	0,9060	1,8957	VOTORANTIM CIMENTOS (2016)
Areia	0,0127	0,1870	PAULA (2016)
Brita natural	0,0187	0,2560	PAULA (2016)
Água	0,0000	0,0000	PAULA (2016)
Aditivo superplastificante	2,1500	27,7000	PAULA (2016)

GWD = Global warming potential (100 anos); ADP = Abiotic depletion potential for fossil resources

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 - Emissão de CO_2 eq. e consumo de energia dos materiais constituintes do UHPC

Material	GWD (kg CO2-eq. / kg material)	ADP (MJ / kg material)	Referência
Cimento Portland (CP V - ARI)	0,9060	1,8957	VOTORANTIM CIMENTOS (2016)
Sílica ativa	0,0000	0,0000	DONG (2018)
Agregados	0,0013	0,0246	DONG (2018)
Água	0,0000	0,0000	DONG (2018)
Aditivo superplastificante	0,0184	0,0875	DONG (2018)
Fibra metálica	0,9400	13,2200	DONG (2018)

GWD = Global warming potential (100 anos); ADP = Abiotic depletion potential for fossil resources

Fonte: Autoria própria

Para a realização dos cálculos de emissão de CO_2 e do consumo de energia para a produção do concreto convencional, serão utilizados dados trazidos por PAULA (2016), que avaliou os impactos ambientais na produção e transporte de traços de concreto utilizando dados obtidos pelo banco de dados Ecoinvent através do software SIMAPRO 8.0.

No caso dos impactos trazidos pela produção do UHPC, serão utilizados dados trazidos por BOUHAYA; LE ROY; FERAILLE-FRESNET (2009) citado por DONG (2018). Os dados dos agregados foram obtidos por meio de um estudo interno, enquanto os do aditivo foram obtidos em SIKA (2005) e os das fibras no Instituto Internacional de ferro e aço (Internarional Iron and Steel Institute, IISSI), que consideram que 40% do aço é reciclado. Para a sílica ativa, seu impacto ambiental de produção é considerado nulo por ser um subproduto da indústria do silício e, portanto, é somente contabilizado o impacto gerado pelo seu transporte.

Por fim, para o cimento usado em ambos os tipos de concreto, os dados utilizados são provenientes da EPD publicada pela VOTORANTIM CIMENTOS (2016).

A comparação entre o concreto convencional e UHPC será realizada entre traços estudados na literatura, sendo selecionado 3 traços de diferentes classes de resistência para cada material. Os traços de concreto convencional são apresentados na Tabela 3 e foram trazidos do trabalho experimental realizado por FROTTÉ et al. (2017) e BANDEIRA et al. (2020), enquanto os traços de UHPC (Tabela 4) são trazidos de um estudo experimental realizado por AGUERO et al. (2019).

Tabela 3 - Traços de concreto convencional selecionados

Classe	Cimento Portland CP V – ARI (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Brita natural (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Referências
C20	322,58	935,48	906,45	208,06	0	FROTTÉ et al. (2017)
C50	445,59	753,05	1029,31	196,06	1,07	BANDEIRA et al (2020)
C65	512,63	656,17	1132,91	174,29	4,10	BANDEIRA et al (2020)

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 - Traços de UHPC selecionados

Classe	Cimento Portland CP V – ARI (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Brita natural (kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Fibra metálica (kg/m³)	Referências
C120	543,00	80,00	1242,00	130,32	*	30,39	AGUERO et al. (2019)
C150	967,00	251,00	675,00	241,75	*	21,56	AGUERO et al. (2019)
C200	1050,00	268,00	514,00	168,00	*	105,26	AGUERO et al. (2019)

* Não citado pela referência

Fonte: Autoria própria

Será determinada a emissão de CO_2 e consumo de energia para a produção de 1m³ para cada traço através da soma dos impactos que cada constituinte do material gera em sua produção, calculadas por meio das equações (1) e (2).

$$\text{kg CO2 eq.} = (\text{kg material} / \text{m}^3) \text{ X } (\text{kg } CO_2 \text{ eq} / \text{kg material}) \quad (1)$$

$$\text{kg CO2 eq.} = (\text{kg material} / \text{m}^3) \text{ X } (\text{MJ} / \text{kg material}) \quad (2)$$

Também será realizada uma comparação entre a relação dos impactos gerados e do consumo de energia com a resistência à compressão obtida em cada traço através das equações (3) e (4).

$$\text{kg CO2 eq.} / \text{MPa} = (\text{kg } CO_2 \text{ eq. do traço} / \text{resistência à compressão}) \quad (3)$$

$$\text{MJ} / \text{MPa} = (\text{MJ do traço} / \text{resistência à compressão}) \quad (4)$$

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos tanto para a emissão de CO_2 quanto consumo de energia para o concreto convencional são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Emissão de CO_2 e consumo de energia dos traços de concreto convencional

	Classe	Cimento Portland CP V - ARI	Areia	Brita	Água	Aditivo	Total
kg CO2 eq.	C20	292,2575	11,8432	16,9325	0,0000	0,0000	321,0332
	C50	403,7045	9,5336	19,2275	0,0000	2,2982	434,7638
	C65	464,4428	8,3071	21,1628	0,0000	8,8131	502,7258
MJ	C20	611,5149	174,8416	231,7792	0,0000	0,0000	1018,1357
	C50	844,7050	140,7450	263,1946	0,0000	29,6228	1278,2674
	C65	971,7927	122,6382	289,6851	0,0000	113,5988	1497,7148

Fonte: Autoria própria

Conforme há um aumento de resistência desejado no traço, há um aumento tanto na emissão de CO_2 e no consumo de energia. Isso se dá principalmente, devido ao aumento do consumo de cimento nos traços, o qual, dentre os materiais constituintes do concreto convencional, é o que mais emite CO_2. Como o consumo de aditivo é bastante reduzido em comparação aos demais materiais, apresenta uma contribuição pequena na emissão do CO_2 e no consumo de energia, mesmo apresentando os maiores valores de impactos ambientais, conforme apresentado na Tabela 1.

Observando os agregados, a areia e a brita apresentam valores não muito distantes de emissão de CO_2 e consumo de energia em sua produção. Tal fato era esperado, pois seus impactos ambientais não são variam muito (menos de 1kg CO2 eq / kg material e menos de 1 MJ / kg material), sendo de maior influência a variação das quantidades desses materiais utilizados no traço.

Os resultados obtidos tanto para a emissão de CO_2 quanto consumo de energia para o UHPC são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Emissão de CO_2 e consumo de energia dos traços de UHPC

	Classe	Cimento Portland CP V - ARI	Sílica ativa	Agregados	Água	Fibras metálicas	Total
kg CO2 eq.	C120	491,9580	0,0000	1,6146	0,0000	28,5625	522,1350
	C150	876,1020	0,0000	0,8775	0,0000	20,2693	897,2488
	C200	951,3000	0,0000	0,6682	0,0000	98,9474	1050,9160
MJ	C120	1029,3650	0,0000	30,6128	0,0000	401,6974	1461,6750
	C150	1833,1420	0,0000	16,6374	0,0000	285,0646	2134,8440
	C200	1990,4850	0,0000	12,6691	0,0000	1391,5790	3394,7330

Fonte: Autoria própria

Assim como para o concreto convencional, conforme aumenta a resistência do traço de UHPC, maior é a emissão de CO_2 e do consumo de energia devido ao maior consumo de cimento dos traços.

Comparando o concreto convencional com o UHPC, é notável a diferença de impacto ambiental que cada um traz. O UHPC apresenta um consumo muito maior de cimento, chegando a ser o triplo do concreto convencional, o que reflete negativamente na emissão de CO_2 e consumo de energia. Entretanto, o uso de sílica ativa e ausência de brita em sua composição amenizam os impactos ambientais, já que o primeiro não traz impactos em sua produção e a ausência do segundo não acrescenta no total.

Além disso, comparando o traço C65 do concreto convencional e o C120 do UHPC, tanto a emissão de CO_2 quanto o consumo de energia de ambos são bastante próximos. Tal fato leva a indicar que é mais vantajoso o uso do UHPC em casos onde é necessário um concreto com maiores resistências.

Como não foi dado informações do aditivo para os traços de UHPC, foi feito uma estimativa dos impactos ambientais que o aditivo causa por meio de traços da literatura citados por EIDE e HISDAL (2012), o qual o consumo de aditivos pode variar entre 0,54% e 3,60% com relação à quantidade de cimento. Utilizando os dados presentes na Tabela 2 para estimar os impactos causados pelo aditivo, os valores de emissão de CO_2, em kg eq., variam entre 5,40E-02 e 6,96E-01 e o consumo de energia, em MJ, variam entre, 2,57E-01 e 3,31E+00. Comparando com o total, o aditivo acaba tendo uma pequena contribuição nos impactos ambientais.

A relação entre a emissão de CO2 e resistência à compressão e entre consumo de energia e resistência à compressão, tanto para concreto convencional quanto UHPC, são apresentados na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Relação entre impactos ambientais e resistência à compressão do concreto convencional e do UHPC

	Classe	Resistência à compressão (MPa)	kg CO_2 eq. / MPa	MJ / MPa
Concreto convencional	C20	29	11,0701	32,1081
	C50	48	9,0576	26,6306
	C65	65	7,7342	23,0418
UHPC	C120	121	4,3152	12,0800
	C150	155	5,7887	13,7732
	C200	205	5,1264	16,5597

Fonte: Autoria própria

Conforme há o aumento da resistência do concreto convencional, há uma tendência na redução tanto da emissão do CO_2 quanto no consumo de energia. No caso do UHPC, houve um aumento no consumo de energia conforme há um aumento na resistência e no caso da emissão de CO_2. não houve um padrão, sendo o traço intermediário o que apresentou maiores valores, seguido do traço com maior resistência e por fim o de menor resistência.

Comparando os dois tipos de concreto, o UHPC apresenta menores valores dessa relação. Isso mostra que a utilização de concretos com maiores resistências à compressão, apesar dos materiais indicarem maiores impactos ambientais, tendem a apresentar menores impactos por unidade de MPa, sendo mais sustentáveis sua utilização em elementos que requerem elevadas resistências.

4 CONCLUSÃO

Considerando o impacto ambiental para produção de 1m³ dos traços analisados, o UHPC é o tipo de concreto que gera mais impactos ambientais, tanto no quesito emissão de CO_2 quanto no consumo de energia. No entanto, o traço de concreto convencional de maior resistência apresenta um impacto ambiental próximo ao do traço de UHPC de menor resistência. Por isso, é importante levar em consideração a contribuição na resistência, o UHPC atinge elevadas resistências, permitindo assim que em projetos elementos estruturais apresentam menor volume de material, refletindo assim em um menor impacto ambiental.

Como recomendação para futuros trabalhos, sugere-se avaliar várias classes de resistência para analisar os impactos ambientais conforme o aumento da resistência à compressão e a relação de impacto por MPa e criar uma possível correlação.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo suporte financeiro.

6 REFERÊNCIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de janeiro, 2001

AGUERO, R. R. et al. Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable brazilians materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 4, p. 766–789, ago. 2019.

BANDEIRA, M. V. V. et al. Resistência à compressão axial do concreto com diferentes direções de carregamento e condições de contorno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 2020.

BARBOSA, U. DA S. et al. REUTILIZAÇÃO DO CONCRETO COMO CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 2, n. 2, p. 383–397, 2018.

BOUHAYA, L.; LE ROY, R.; FERAILLE-FRESNET, A. Simplified Environmental Study on Innovative Bridge Structure. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 6, p. 2066–2071, 15 mar. 2009.

DONG, Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 414–425, abr. 2018.

EIDE, M. B.; HISDAL, J.-M. **Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.coinweb.no>.

FROTTÉ, C. et al. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Revista Materia**, v. 22, n. 2, 2017.

PAULA, R. R. DE. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE ARGAMASSAS E CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

RIGHI, D. P. et al. COBERTURA VERDE: UM USO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **MIX Sustentável**, v. 2, n. 2, p. 29, 12 set. 2016.

SILVA, L. C. **AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E DA CASCA DE ARROZ**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SOUZA, A. DE. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto - SP**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS CENTRO, 2012.

STENGEL, T.; SCHIEBL, P. Life cycle assessment of UHPC bridge constructions: Sherbrooke footbridge, Kassel Gartnerplatz footbridge and Wapello road bridge. **Architecture Civil Engineering Environment**, v. 2, n. 1, p. 109–118, 2009.

VOTORANTIM CIMENTOS. **EPD: Cements CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI by Votorantim Cimentos**. [s.l: s.n.].

ZHONG, R.; WILLE, K.; VIEGAS, R. Material efficiency in the design of UHPC paste from a life cycle point of view. **Construction and Building Materials**, v. 160, n. 2, p. 505–513, jan. 2018.