Propriedades mecânicas e avaliação do ciclo de vida de concretos de ultra-alto desempenho produzidos com cinza da casca de arroz

Mechanical properties e life cycle assessment of ultra-high performance concretes produced with rice husk ash

Bruno Athaíde Bacelar
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | brunoathaide@gmail.com

Isabela Domingues Coelho
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | isabeladcoelho@gmail.com

Thiago Marques Viana
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | thiago.m.viana@hotmail.com

Péter Ludvig
CEFET-MG | Belo Horizonte, Minas Gerais | peter@cefetmg.br

Resumo

A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pelos impactos ambientais, especialmente devido às emissões de CO_2 na produção de cimento. O Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC), embora apresente excelentes propriedades mecânicas, demanda alto consumo de cimento (superior a 800 kg/m³), limitando sua sustentabilidade. Este estudo propôs a substituição parcial de cimento por Cinza da Casca de Arroz (CCA) em UHPC, com taxas de até 60%. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e flexão, além de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Os resultados mostraram que a substituição de 20% de cimento por CCA aumentou a resistência à compressão, enquanto taxas maiores (40% e 60%) reduziram a resistência em até 12%. A ACV indicou reduções de até 50% nas emissões de CO_2. Conclui-se que a CCA é uma alternativa viável para a produção de UHPCs mais sustentáveis, mesmo em altas taxas de substituição.

Palavras-chave: UHPC. Cinza da Casca de Arroz. Avaliação do Ciclo de Vida. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The construction industry is one of the main contributors to environmental impacts, especially due to CO_2 emissions from cement production. Ultra-High Performance Concrete (UHPC), despite its excellent mechanical properties, requires high cement consumption (over 800 kg/m³), limiting its sustainability. This study proposed the partial replacement of cement with Rice Husk Ash (RHA) in UHPC, with replacement rates of up to 60%. Compression and flexural strength tests were performed, along with a Life Cycle Assessment (LCA). The results showed that replacing 20% of cement with RHA increased compressive strength, while higher replacement rates (40% and 60%) reduced strength by up to 12%. The LCA indicated reductions of up to 50% in CO_2 emissions. It is concluded that RHA is a viable alternative for producing more sustainable UHPC, even at high replacement rates.

Keywords: UHPC. Rice Husk Ash. Life Cycle Assessment. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm aumentado a demanda por soluções sustentáveis na construção civil, setor responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2, principalmente devido à produção de cimento (Bashmakov *et al.,* 2022). Estratégias como a redução do consumo de cimento e a substituição de clínquer por materiais alternativos são essenciais para mitigar esses impactos (Mehta, 2009).

Nesse contexto, o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC) surge como uma alternativa promissora, com resistência à compressão superior a 120 MPa e alta durabilidade (Pollner *et al*., 2022; SIA, 2016). No entanto, sua produção requer mais de 800 kg/m³ de cimento, comprometendo sua sustentabilidade (Larsen; Thorstensen; Vertes, 2019).

Devido ao alto consumo de cimento e à baixa relação água/cimento, nem todas as partículas de cimento são hidratadas, fazendo com que boa parte do material atue como *filler* na microestrutura (Park *et al*., 2021). Por isso, parte do cimento pode ser substituída para melhorar a ecoeficiência dos UHPCs. Stengel e Schiessl (2014) indica o valor de 50% de substituição de cimento para que o UHPC tenha impactos ambientais do mesmo nível de concretos convencionais sem perder suas elevadas propriedades mecânicas.

Diante desse desafio, a substituição parcial de cimento por materiais cimentícios suplementares (SCMs) tem se mostrado uma estratégia eficaz. Entre as opções disponíveis, encontra-se a cinza de casca de arroz (CCA), um resíduo da agricultura rico em sílica amorfa (Van Tuan *et al*., 2011). A CCA possui propriedades pozolânicas que permitem a redução de cimento sem comprometer as propriedades mecânicas, mas sua menor densidade e maior porosidade limitam sua aplicação em altas taxas de substituição (Alyami *et al*., 2023).

Este estudo tem como objetivo desenvolver UHPCs com diferentes taxas de substituição de cimento por CCA, avaliando suas propriedades mecânicas e impactos ambientais. Para isso, foram produzidos traços de UHPC com taxas de substituição de até 60%. Ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão foram realizados para avaliação das propriedades mecânicas. Uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi realizada para quantificação dos impactos ambientais dos UHPCs desenvolvidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os traços de UHPC desenvolvidos nessa pesquisa foram produzidos com Cimento CP V ARI, Sílica Ativa não densificada, Pó de Quartzo, Areia de Quartzo fina, água e uma combinação de aditivos superplastificante e modificador de viscosidade para controle de trabalhabilidade.

Cimento foi substituído por Cinza da Casca de Arroz em 20%, 40% e 60% em peso, alterando o volume nos traços produzidos devido às diferentes densidades dos materiais. Portanto, valores de areia foram variados a fim de obter 1 m³ de UHPC em todos os traços. Os traços desenvolvidos são apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1: Composição dos UHPCs produzidos

Traço	Cimento (kg/m³)	CCA (kg/m³)	Sílica Ativa (kg/m³)	Pó de Quartzo (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Água (kg/m³)	Superplastificante (kg/m³)
REF	900	0	189	225	887	0,20	54
CCA20	720	180	189	225	824		
CCA40	540	360	189	225	761		
CCA60	360	540	189	225	698		

Fonte: Os Autores

O UHPC foi produzido num misturador vertical com velocidade de 48 RPM (Figura 1). Primeiramente todos os materiais secos foram adicionados ao equipamento e misturados por dois minutos. Após esse período, água e superplastificante foram adicionados e a mistura prosseguiu por 10 minutos.

2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Ensaios de resistência à compressão e resistência à flexão foram realizados aos 28 dias de idade, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma EN 196 (European Standards, 2016). Para ensaios de resistência à compressão, seis corpos de prova cúbicos de dimensões 4 cm x 4 cm x 4 cm foram ensaiados em uma

máquina universal de ensaios com uma taxa de carregamento de 2400 N/s. Para ensaios de flexão, ensaios 3 corpos de prova de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm foram ensaiados com taxa de carregamento de 50 N/s e vão entre apoios de 10 cm.

Figura 1: Misturador vertical utilizado na produção do UHPC



Fonte: Os Autores

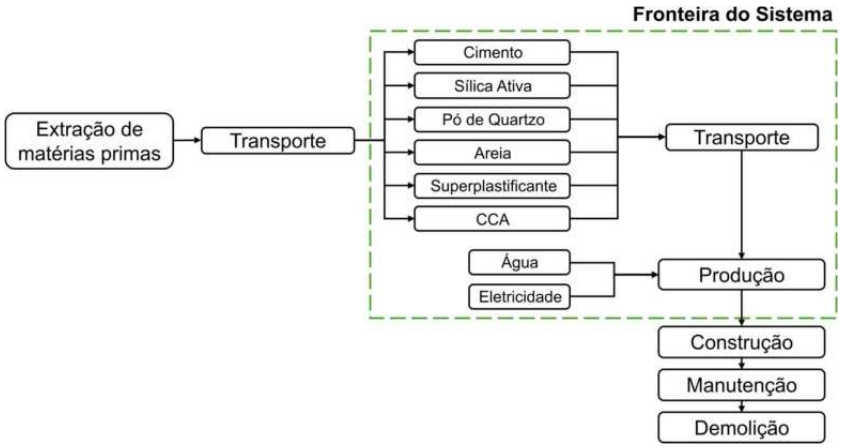
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi desenvolvida seguindo os procedimentos das normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b). A ACV foi produzida em quatro etapas: i) definição de objetivo e escopo; ii) inventário do ciclo de vida (ICV); iii) avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV); iv) interpretação dos resultados.

O software OpenLCA® (Ciroth, 2007) foi utilizado para o desenvolvimento da ACV. Uma unidade funcional de 1 m^3 de UHPC foi adotada para a comparação entre os diferentes traços de UHPC. O escopo do estudo consiste na produção de traços de UHPC do berço ao portão da fábrica, ou seja, da extração de matérias-primas à produção do concreto (Figura 2). A metodologia Impact World+ 2.1 (Bulle *et al*., 2019) foi utilizada para a AICV e 10 diferentes categorias de impacto foram estudadas para avaliar os traços de UHPC produzidos.

Para a criação do inventário do ciclo de vida (ICV), dados relacionados ao cimento, pó de quartzo e areia foram obtidos a partir da base de dados Ecoinvent (2021). Foi realizada uma alocação de 4,8% em massa dos impactos do ferro silício para a produção de sílica ativa, conforme sugerido por Timm, Morales e Pasuello (2019). As informações sobre a CCA basearam-se nas considerações apresentadas por Silva (2015). Um valor de 2,7 kWh foi adotado como padrão para a produção de 1 m^3 de concreto, de acordo com Costa Reis e John (2022). Os valores adotados para as distâncias de transporte são apresentados na Tabela 2.

Figura 2: Fronteira da ACV



Fonte: Os Autores

Tabela 2: Distâncias de transporte

Material	Origem	Destino	Distância (km)
Cimento	Pedro Leopoldo, MG	Belo Horizonte, MG	35
CCA	Alegrete, RS		2000
Sílica Ativa	Pirapora, MG		350
Pó de Quartzo	Analândia, SP		600
Areia de Quartzo	Nova Lima, MG		40
Superplastificante	Osasco, SP		600

Fonte: Os Autores

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

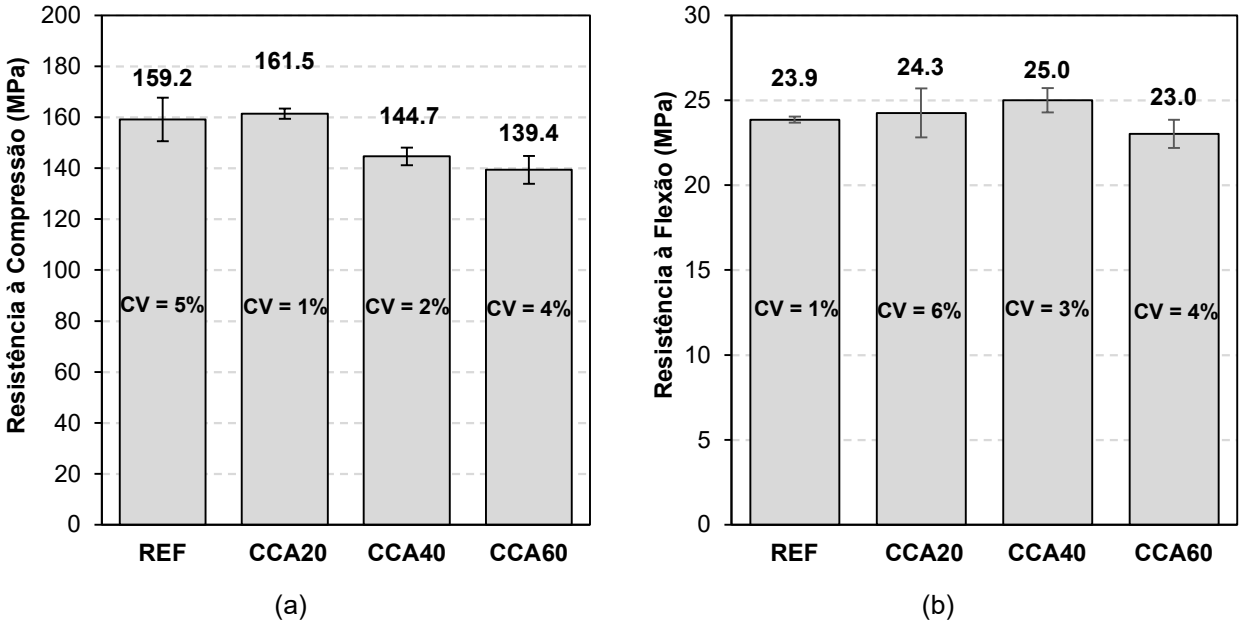
Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas são apresentados na Figura 3. Analisando os resultados de resistência à compressão, a mistura REF, sem substituição de cimento, apresentou o maior valor, 159,2 MPa. É possível observar um pequeno aumento na resistência à compressão para a substituição de 20% de cimento. Esse aumento pode ser explicado pelo efeito *filler*, proporcionado pela alta área superficial específica da CCA, e o efeito pozolânico, proporcionado pelo alto conteúdo de sílica amorfa do material (Van Tuan *et al*., 2011).

Para os traços CCA40 e CCA60 foram observadas reduções na resistência à compressão de 9% e 12%, respectivamente. Essa redução se dá pelo efeito de diluição pela redução de cimento de 900 kg/m^3 para 540 kg/m^3 e 360 kg/m^3 (Alyami *et al*., 2023). Entretanto, destaca-se à baixa redução na resistência à compressão considerando os altos valores de substituição de cimento nos traços.

A alta porosidade da CCA absorve parte da água de hidratação, reduzindo a resistência inicial. Esses poros da CCA, porém, atuam como reservatórios de água. À medida que a hidratação do cimento avança há uma queda na humidade relativa na pasta de cimento e a água absorvida é liberada, promovendo a hidratação de mais partículas de cimento (Park; Kwon; Wang, 2016). Com isso, é esperado que o desenvolvimento resistência à compressão continue para idades além dos 28 dias.

A substituição parcial de cimento por CCA afeta de forma diferente os resultados de resistência à tração na flexão em relação aos de compressão. Enquanto a compressão é mais sensível à redução do cimento, a flexão pode se beneficiar de efeitos microestruturais da CCA em substituições de até 40%. Isso indica uma microestrutura mais densa, como menos poros, aumentando o desempenho à flexão dos traços produzidos (Zhang *et al*., 2024).

Figura 3: a) Resistência à compressão dos UHPCs produzidos; b) Resistência à tração na flexão



Fonte: Os Autores

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Os resultados da avaliação do ciclo de vida são apresentados em valores totais na Tabela 1 e normalizados na Figura 4. Analisando o efeito da substituição de cimento por CCA no UHPC, há uma redução dos impactos ambientais em todas as categorias quando o cimento é substituído pela CCA.

Destacando a categoria *Climate change, short term*, referente às emissões de CO_2, os resultados mostram uma redução de quase 50% pela utilização da CCA. A mistura REF (0% CCA) apresentou o maior resultado, com 980 $kgCO_2eq$, enquanto as misturas com substituição de cimento por CCA tiveram reduções progressivas: CCA20 (20% CCA) emitiu 820 $kgCO_2eq$, CCA 40 (40% CCA) emitiu 670 $kgCO_2eq$, e CCA60 (60% CCA) emitiu 520 $kgCO_2eq$.

A Figura 5 apresenta os resultados de emissões de CO_2 do UHPC com a contribuição dos materiais e do consumo de energia elétrica. O pó de quartzo e a sílica ativa possuem impactos ambientais pouco significativos na produção do UHPC. O alto volume de superplastificante faz com o que material seja o segundo maior responsável pelos impactos ambientais do UHPC. É normal que valores em torno de 3% de superplastificante em peso de cimento sejam utilizados na produção do UHPC. Entretanto, devido às propriedades físicas da CCA, uma quantidade maior foi necessária para obter boa trabalhabilidade nos traços, resultando numa maior contribuição nos impactos do UHPC.

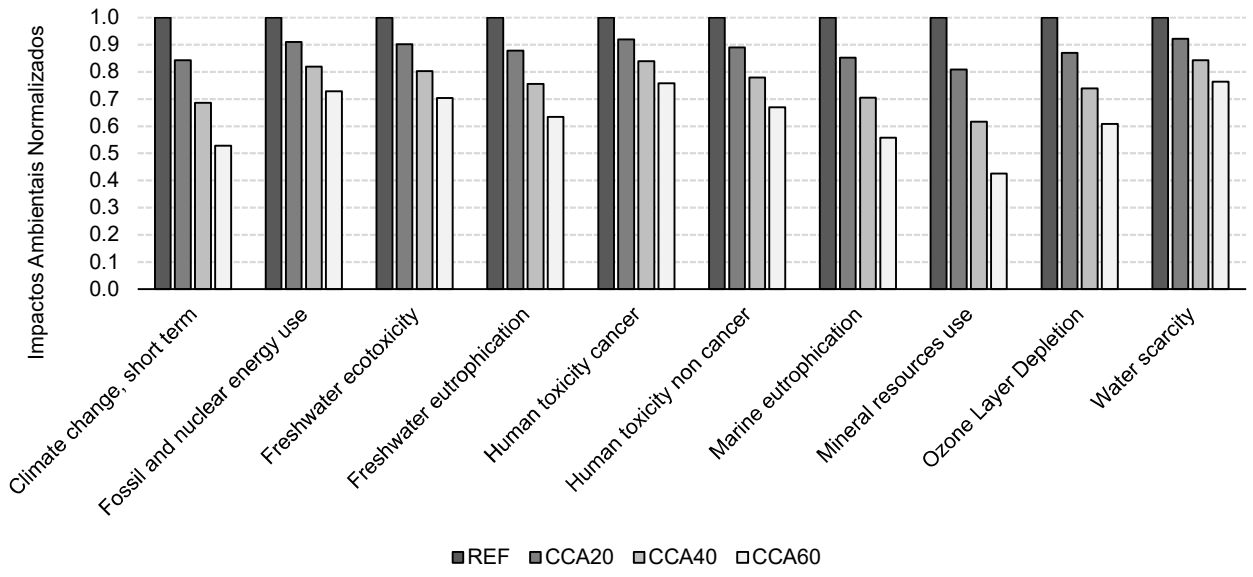
Essa redução dos impactos ambientais em todas as categorias estudadas destaca o potencial da CCA como material para utilização como substituição ao cimento, reduzindo o impacto ambiental do UHPC. É interessante notar que, mesmo com a distância de transporte de 2000 km e a necessidade de calcinação do material para eliminação de matéria orgânica, os impactos devido à CCA ainda são muito inferiores aos impactos causados pelo cimento, indicando a viabilidade de utilização do material para regiões distantes da de produção do material.

Tabela 3: Resultados da ACV

Categoria de impacto	Unidade	REF	CCA20	CCA40	CCA60
Climate change, short term	kg CO2 eq (short)	9.8E+02	8.2E+02	6.7E+02	5.2E+02
Fossil and nuclear energy use	MJ deprived	8.3E+03	7.5E+03	6.8E+03	6.0E+03
Freshwater ecotoxicity	CTUe	9.9E+04	8.9E+04	7.9E+04	6.9E+04
Freshwater eutrophication	kg PO4 P-lim eq	4.6E-02	4.0E-02	3.4E-02	2.9E-02
Human toxicity cancer	CTUh	5.8E-06	5.3E-06	4.9E-06	4.4E-06
Human toxicity non cancer	CTUh	2.6E-05	2.4E-05	2.1E-05	1.8E-05
Marine eutrophication	kg N N-lim eq	9.9E-02	8.4E-02	7.0E-02	5.5E-02
Mineral resources use	kg deprived	6.5E+01	5.2E+01	4.0E+01	2.8E+01
Ozone Layer Depletion	kg CFC-11 eq	8.9E-05	7.7E-05	6.5E-05	5.4E-05
Water scarcity	m3 world-eq	9.1E+01	8.4E+01	7.7E+01	6.9E+01

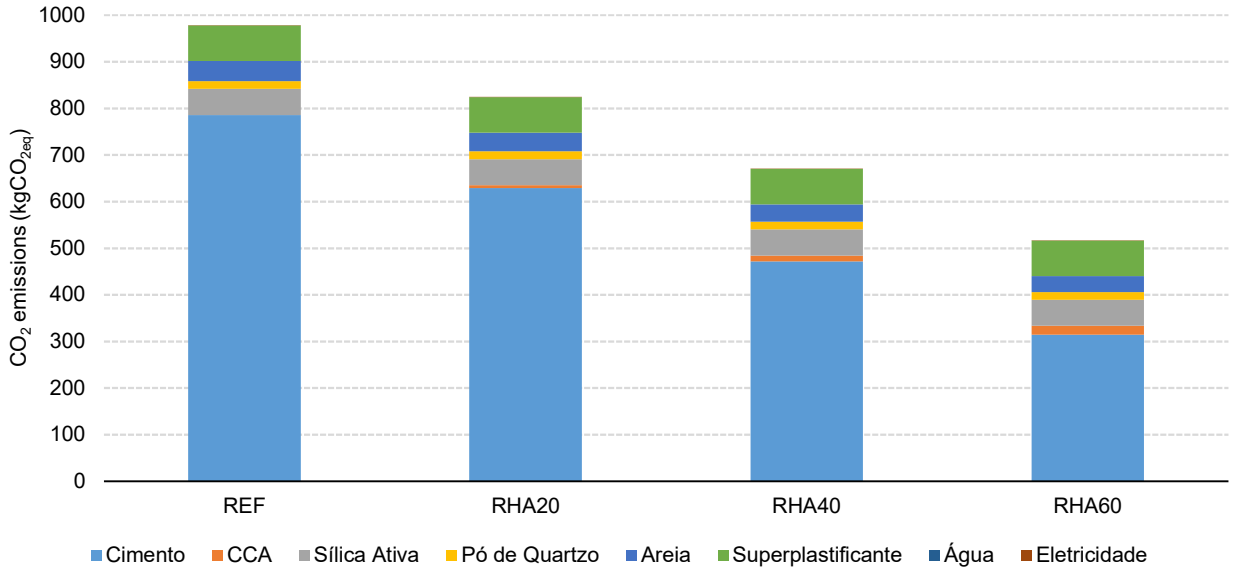
Fonte: Os Autores

Figura 4: Resultados da ACV



Fonte: Os Autores

Figura 5: Emissões de CO_2 do UHPC



Fonte: Os Autores

4 CONCLUSÕES

O presente estudo desenvolveu diferentes traços de UHPC com substituição parcial de cimento por CCA em até 60% em peso de cimento. Foram estudadas suas propriedades mecânicas, com realização de ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, e seus impactos ambientais, com o desenvolvimento de uma ACV.

Quanto às propriedades mecânicas, foi observado um ganho de resistência para a substituição em taxas de até 20% (CCA20). Isso se deve à combinação da atividade pozolânica da CCA e do efeito filler pela finura do material. Isso não foi ocorreu para os traços CCA40 e CCA60 devido a um maior efeito da diluição do cimento nesses traços. Entretanto, a alta porosidade da CCA absorve parte da água de hidratação do cimento e a libera ao longo do tempo. Portanto, se espera que, apesar das reduções para os traços CCA40 e CCA60, haja um desenvolvimento de resistência adicional em maiores idades.

Com o desenvolvimento da ACV foi possível determinar todas as categorias de impacto estudadas obtiveram reduções dos impactos ambientais. Os resultados indicam que a CCA é um material viável para a produção de UHPCs com baixo teor de cimento, apesar da necessidade de queima e da alta distância de transporte.

Apesar de os maiores valores para as propriedades mecânicas terem sido obtidos para o traço CCA20, é possível produzir UHPCs com até 60% de substituição de cimento com reduções em torno de 10% de sua resistência à compressão e de até 50% em seus impactos ambientais.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), da Fundação de Amparo à pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Esta pesquisa também foi apoiada pelo fornecimento de materiais por Silcca Nobre, Sika Brasil e LIASA.

REFERÊNCIAS

ALYAMI, M. *et al.* Effect of agricultural olive, rice husk and sugarcane leaf waste ashes on sustainable ultra-high-performance concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 72, 2023.

BASHMAKOV, I. A. *et al.* Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Em: Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2022.

BULLE, C. *et al.* IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 9, p. 1653–1674, 2019.

CIROTH, A. New LCA Software ICT for Environment in Life Cycle Applications openLCA − A new open source software for Life Cycle Assessment. v. 12, n. 4, p. 209–210, 2007.

COSTA REIS, D.; JOHN, V. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: Concreto. São Paulo: SIDAC, 2022.

ECOINVENT. **ecoinvent 3.7**. , 2021.

EUROPEAN STANDARDS. **EN-196-1:** Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. , 2016.

ISO. **ISO 14040:** Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Switzerland: ISO, 2006a.

ISO. **ISO 14044:** Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006b.

LARSEN, I. L.; THORSTENSEN, R. T.; VERTES, K. **Efficient use of fibres in UHPC - A structured scoping review**. FIB 2018 - Proceedings for the 2018 fib Congress: Better, Smarter, Stronger. **Anais**... Em: 5TH FIB CONGRESS, FIB 2018. 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081077999&partnerID=40&md5=05374206ae8ed417233018757eb610ef>. Acesso em: 7 out. 2018

MEHTA, P. K. Global Concrete Industry Sustainability. **Concrete International**, v. 31, n. 2, p. 45–58, 2009.

PARK, K.-B.; KWON, S.-J.; WANG, X.-Y. Analysis of the effects of rice husk ash on the hydration of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 196–205, fev. 2016.

PARK, S. *et al.* The role of supplementary cementitious materials (Scms) in ultra high performance concrete (uhpc): A review. **Materials**, v. 14, n. 6, 2021.

POLLNER, T. et al. Chloride penetration resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete - how to test the performance using the rapid chloride migration test. 6th fib International Congress in Oslo, Norway (2022) proceedings. **Anais**... Em: FIB INTERNATIONAL CONGRESS. Oslo: 2022.

SIA. **Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) – Materials, design and execution**. , 2016. Disponível em: <http://infoscience.epfl.ch/record/225460>

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**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

STENGEL, T.; SCHIESSL, P. Life cycle assessment (LCA) of ultra high performance concrete (UHPC) structures. Em: **Eco-efficient Construction and Building Materials**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 528–564.

TIMM, J. F. G.; MORALES, M. F. D.; PASSUELLO, A. Sensitivity Analysis of Life Cycle Impacts Distribution Methods Choice Applied to Silica Fume Production. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, n. 1, p. 012131, 1 ago. 2019.

VAN TUAN, N. et al. Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1104–1111, nov. 2011.

ZHANG, C. et al. Influence of limestone powder on water film thickness and plastic viscosity of UHPC. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e03036, jul. 2024.