

Estudo de sustentabilidade de soluções de UHPC eco-eficientes

Sustainability study of eco-efficient UHPC solutions

José D. Silvestre
Júlia Fontoura

Resumo

Este artigo apresenta o perfil ambiental e económico dos betões de ultraelevado desempenho (Ultra High-Performance Concrete – UHPC) com formulações alternativas eco-eficientes desenvolvidos no âmbito do projeto *Pre-Shell*. Este estudo considerou um UHPC de referência e o levantamento do estado da arte relativo à sustentabilidade ambiental e económica destes materiais, a fim de potenciar a minimização dos impactos causados pelos componentes deste produto. Uma vez que o cimento usado nos UHPC é um dos grandes poluidores atmosféricos da indústria da Construção Civil, o projeto *Pre-Shell* visou a redução da dosagem desse material na composição do produto final através da adição de materiais cimentícios suplementares (Supplementary Cementitious Materials – SCMs). Obtiveram-se os resultados esperados para o contributo do cimento para os impactos ambientais das composições, mas as fibras metálicas também apresentaram valores relevantes para as análises de eco-eficiência na produção das misturas, tendo nomeadamente impacto negativo nas dimensões ambiental e económica.

Abstract

This paper presents the environmental and economic profile of Ultra High-Performance Concrete (UHPC) with alternative eco-efficient formulations developed under the *Pre-Shell* project. This study considered a reference UHPC and the state of the art regarding the environmental and economic sustainability of these materials, in order to minimise the impacts caused by their components. Since the cement used in UHPCs is one of the biggest air polluters in the construction industry, the *Pre-shell* project aimed to reduce the dosage of this material in the final product by adding Supplementary Cementitious Materials (SCMs). The expected results for the contribution of cement to the environmental impacts of the compositions were achieved, but the metal fibres also showed relevant values for the eco-efficiency analyses in the production of the mixtures, having namely a negative impact on the environmental and economic dimensions.

Palavras-chave: Betão de ultraelevado desempenho / Eco-design / Sustentável /
/ Impacte ambiental / Impacte económico

Keywords: Ultra High-Performance Concrete / Eco-design / Sustainable /
/ Environmental impact / Economic impact

José D. Silvestre

Professor Associado
CERIS / IST / UL
Lisboa, Portugal
jose.silvestre@tecnico.ulisboa.pt

Júlia Fontoura

Aluna de Mestrado em Engenharia Civil
CERIS / IST / UL
Lisboa, Portugal
julia.fontoura@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SILVESTRE, J. [et al.] – Estudo de sustentabilidade de soluções de UHPC eco-eficientes. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 23. ISSN 2183-8488. (novembro 2023) 45-52. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n23-004>

1 Introdução

A produção de cimento Portland é responsável por uma alta taxa de libertação de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera, a qual pode ser diminuída a partir da sua substituição parcial nas misturas por adições, resíduos ou subprodutos, como sejam as cinzas volantes, as escórias e a sílica de fumo. Assim, com o objetivo de contribuir para uma construção mais sustentável e de menor custo, o projeto *Pre-Shell* procurou maneiras de reduzir as dosagens de cimento incorporado nos betões de ultraelevado desempenho (Ultra High-Performance Concrete – UHPC), recorrendo ao estudo da sua substituição parcial nas misturas convencionais por diferentes alternativas de materiais cimentícios suplementares (Supplementary Cementitious Materials – SCMs), de forma a obter como produto final um betão mais sustentável e económico com o desempenho equivalente ao de um UHPC tradicional.

Quanto ao desempenho ambiental, para que uma mistura de UHPC tenha menor impacto, é preciso que o cimento seja substituído por adjuvantes minerais, como escória moída de alto forno e filer calcário, e subprodutos, como cinzas volantes e sílica de fumo [1], e posteriormente a prescrição do betão se baseie no modelo de empacotamento otimizado de partículas [2]. Nesse sentido, também foi constatada a redução dos impactos ambientais causados pelo UHPC através da substituição do cimento por duas formas de escórias industriais e filer calcário [3], uma vez que a redução da pegada de carbono deste material é proporcional à substituição do cimento pelo filer calcário [4], e a redução da sua energia incorporada (consumo de energia na sua produção) é proporcional à redução do teor de cimento e fibras de aço incorporados [5].

Do ponto de vista económico, ao considerar misturas convencionais de UHPC e alternativas com substituição do cimento e da sílica de fumo por SCMs, como escória de forno elétrico, escória moída de alto forno, filer calcário e micro-calcário, pó de vidro reciclado, farinha de vidro reciclado, cinzas volantes de carvão não queimado e resíduo de catalisador de processo de craqueamento catalítico fluido, as misturas que se apresentam mais rentáveis são as alternativas com filer micro-calcário e farinha de vidro reciclado [6]. Também a nível nacional a utilização das cinzas volantes, das escórias e da sílica de fumo apresenta algumas limitações, como a dificuldade de aprovisionamento devido à ausência da sua produção local, com o consequente elevado custo.

2 Avaliação de eco-eficiência

O estudo da otimização eco-eficiente do UHPC considerou, simultaneamente, os cenários de impactos ambientais, económicos e o desempenho mecânico deste material. A presente análise foi utilizada de forma a contribuir para a seleção da composição do UHPC em desenvolvimento no projeto *Pre-Shell*.

Para a avaliação da sustentabilidade ambiental, selecionaram-se as duas categorias consideradas mais relevantes [7], nomeadamente a pegada de carbono deste material, analisando os parâmetros relacionados com o Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential – GWP), e a energia incorporada através da sua componente não-renovável (Primary Energy, Non-Renewable

– PE-NRe); no âmbito da avaliação económica, foram estudados os custos absolutos das misturas e a influência parcial de cada componente utilizado no valor final.

O desempenho mecânico em estado endurecido do material foi analisado pelos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade e a sua durabilidade foi avaliada pela resistência à penetração de cloretos. Estes resultados não são apresentados nem analisados em detalhe neste artigo dado que foram objeto de outras publicações no âmbito deste projeto.

2.1 Avaliação da sustentabilidade ambiental

2.1.1 Metodologia

Esta análise incluiu a modelação do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dos componentes dos UHPCs em estudo com base num fluxograma de extração e processamento de matérias-primas (Tabela 1), sem incluir o transporte dos materiais para o local da produção nem a

seu processo de mistura, resultando, portanto, numa Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ambiental simplificada.

A ACV, baseou-se em diretrizes incluídas nas normas europeias aplicáveis (EN 15804+A2: 2019) e assumiu-se 1 m³ de UHPC como unidade declarada, apresentando todas as misturas em análise um desempenho mecânico e de durabilidade mínimo para poderem ser utilizadas em obra (embora estes resultados não sejam apresentados nem analisados em detalhe neste artigo dado que foram objeto de outras publicações no âmbito deste projeto).

Também foi aplicada a metodologia NativeLCA [8], recorrendo a perfis ambientais existentes em bases de dados internacionais, de modo a selecionar conjuntos de dados de ACV para serem usados como genéricos no contexto nacional.

A pegada de carbono foi calculada com base na categoria de impacto ambiental GWP, medida em kg CO₂/m³ de UHPC, e a energia primária (energia incorporada) não renovável foi calculada com base na categoria de impacto ambiental PE-NRe e medida em MJ/m³ de UHPC (Tabela 2).

Tabela 1 Composição das misturas

Matéria-prima (kg/m ³) / Mistura	M0-500	M0	M1	M2	M3	M3b	M4	M4b	M5	M6	M7	M8	M9
Cimento	500	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Sílica de fumo													50
Pó de vidro												150	
Cinza volante	300	250	250	250	250	250	250	250					
Fíler calcário	200	150	150	150	150	150	150	150	250	250	250	250	350
Escória moída de alto forno									150				
Escória de forno elétrico										150			
Pozolana natural											150		
Água	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
Superplastificante	19	21	24	21	18	16,8	21	30	28,2	30	30	27	23,4
Microfibras metálicas	157	157	157	157	117,8	78,5	117,8		157	157	157	157	157
Macro fibras metálicas					39,3	78,5							
Fibras poliméricas híbridas							9,2	27,6					
Microfibras de vidro								13,3					
Areia fina	789	854,1	1012,4	802	807	778	780	940,1	810	842	776	818	817
Areia grossa	197	213,5							202	210	194	204,5	204
Areão				200	202	195	195	0					

Tabela 2 Custo, pegada de carbono e energia incorporada unitários de cada matéria-prima

Matéria-prima (kg/m³)	Custo (€/kg)	GWP (kgCO ₂ eq./kg)	PE-NRE (MJ/kg)
Cimento	0,14	8,98E-01	3,70E+00
Sílica de fumo	1,50	3,10E-03	4,62E-02
Pó de vidro	0,02	2,54E-02	1,55E-01
Cinza volante	0,045	3,92E-03	4,30E-02
Fíler calcário	0,02	3,98E-02	6,80E-01
Escória moída de alto forno	0,02	7,66E-02	1,27E+00
Escória de forno elétrico	0,02	2,08E-03	2,38E-02
Pozzolana natural	0,02	3,98E-02	6,80E-01
Água	0,002	1,33E-04	1,94E-03
Superplastificante	2,68	1,88E-03	3,14E-02
Microfibras metálicas	4,5	1,03E+00	1,06E+01
Macro fibras metálicas	2,5	1,03E+00	1,06E+01
Fibras poliméricas híbridas	4	1,35E+01	9,54E+01
Microfibras de vidro	1,8	2,70E+00	4,12E+01
Areia fina	0,004	1,73E-03	1,76E-02
Areia grossa	0,004	1,73E-03	1,76E-02
Areão	0,004	1,73E-03	1,76E-02

2.1.2 Análise de resultados

A partir do índice de contribuição da produção de cada componente das misturas para o GWP apresentado na Figura 1, foi observado que, em todos os casos analisados, o cimento é o componente causador de maior impacto, apresentando um contributo entre 56 e 76%. As microfibras metálicas apresentam-se como segundo componente de maior impacto nas misturas, com taxas entre 11 e 26%, com exceção da mistura M4b, a qual apresenta maior destaque para as fibras poliméricas híbridas (39%). No caso da mistura M4, esses dois últimos componentes apresentam contribuição igual, com impactes de 15 a 16%, enquanto na mistura M3b há contribuição equivalente entre as micro e macrofibras metálicas e igual a 11%. O impacto dos outros componentes das misturas em estudo é inferior a 5%.

A análise realizada para a PE-NRe (Figura 2) mostra que, novamente, o componente de maior impacto é o cimento, com valores entre 50 e 55% para todos os casos, exceto para a mistura M4b, a qual apresenta as fibras poliméricas híbridas com contributo de 48% e o cimento com 40%. No geral, o segundo contributo de maior importância são as microfibras metálicas, que apresentaram valores entre 21 e 45%. Para o caso da mistura M3b, foi observada novamente uma contribuição equivalente das micro e macrofibras metálicas, para esse parâmetro com índice de impacto igual a 21%. As microfibras de vidro também apresentaram impactes relevantes para o caso da mistura M4b, com valores de 10%. Todos os outros componentes apresentaram índices iguais ou inferiores a 6% nas análises realizadas.

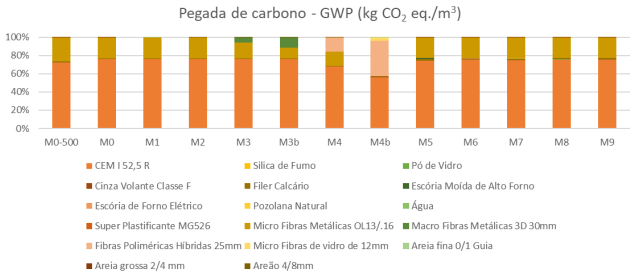


Figura 1 Contribuição de cada componente para o GWP das misturas

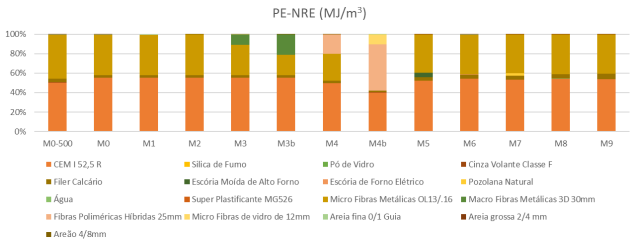


Figura 2 Contribuição de cada componente para o PE-NRe das misturas

Os impactes em termos de pegada de carbono e energia incorporada analisados nas misturas estudadas estão maioritariamente associados à produção de cimento e das fibras de aço. A mistura

de referência M0-500, que apresenta menor conteúdo em cimento (Tabela 1), resultou num melhor desempenho, seguida da M0 e M3b, que apresentam valores idênticos. Em contraponto, a amassadura M4b resultou em maior impacto ambiental nas duas categorias analisadas, o que é explicado pela incorporação de maior quantidade de fibras poliméricas híbridas (Tabela 1).

O gráfico da Figura 3 compara os valores de GWP e PE-NRe obtidos para as amassaduras com a de melhor desempenho (M0-500, que apresenta 622 kg.CO₂.eq/m³ e 3,680 MJ/m³, respetivamente), e pode-se observar que a maior parte da campanha experimental apresentou desempenho de 15 a 26% pior que a referência, com exceção da M4 (35% pior em ambas as categorias) e M4b (pior em 68% de GWP e 82% de PE-NRe). De modo geral, as misturas em estudo apresentam valores de eco-eficiência ambiental entre 4,2 e 10,4 kg.CO₂.eq/m³/MPa.

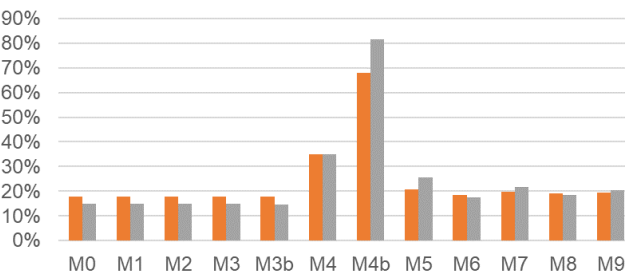


Figura 3 Aumento de GWP (laranja) e PE-NRe (cinza) em relação à mistura M0-500

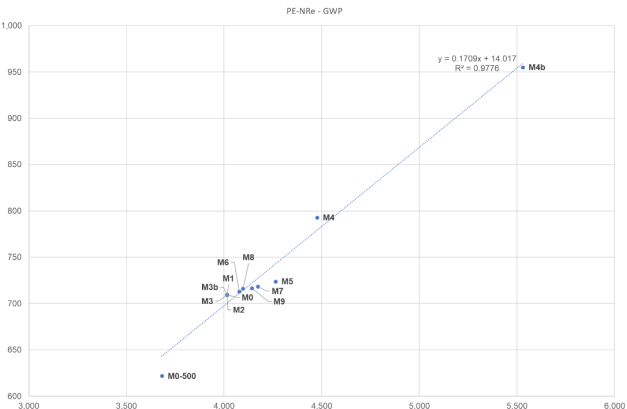


Figura 4 Relação de proporcionalidade PE-NRe (MJ/m³) VS GWP (kg.CO₂.eq/m³)

Para confirmar a plausibilidade dos resultados encontrados, os valores obtidos para os dois parâmetros da análise de sustentabilidade

ambiental (GWP e PE-NRe) foram cruzados (Figura 4) e o ajuste encontrado para o gráfico linear gerado foi de 98% – valor dentro do esperado para a relação de proporcionalidade [9].

2.2 Avaliação económica

2.2.1 Metodologia

Para a estimativa do custo inicial dos UHPCs de referência e alternativos foram considerados dados de estudos anteriores e valores de mercado de forma a analisar a contribuição de cada componente presente nas misturas para o custo das mesmas.

2.2.2 Análise de resultados

O componente de maior contribuição para o custo das misturas são as microfibras metálicas, que têm uma influência de 51 a 83% (Figura 5). A exceção está na M4b, que não apresenta fibras metálicas na sua composição (Tabela 1), sendo a maior influência nesse caso relativa ao custo das fibras poliméricas híbridas (35%). Nas misturas M3 e M3b, o segundo material de maior custo são as macrofibras metálicas, com 13 e 28% de influência, respetivamente, enquanto que nas outras misturas o cimento se destaca com 8 a 26%. Na mistura M4b, o superplastificante também apresenta um contributo importante (25%). Os restantes componentes utilizados apresentaram resultados inferiores a 10%.

A mistura M0-500 também apresentou o melhor resultado no custo absoluto em €/m³, seguida das amassaduras M0 a M3b (Tabela 3). Mais uma vez o resultado final apresenta-se como consequência da diminuição da quantidade de cimento utilizada na amassadura (Tabela 1). Para o desempenho económico, a mistura M4b mostrou-se como a melhor opção quando comparada às outras, principalmente por ser a única que não incorpora fibras metálicas (Tabela 1). Quanto à eco-eficiência económica, as misturas estão entre os índices 3,44 e 6,09 €/MPa/m³.

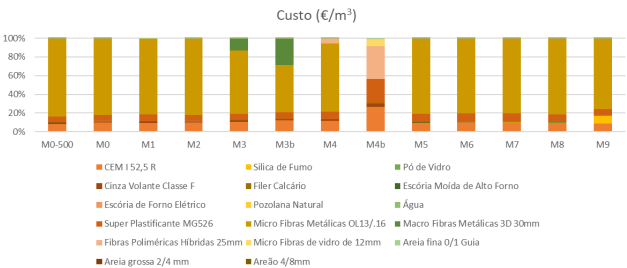


Figura 5 Contribuição de cada componente para o custo das misturas

Tabela 3 Custo absoluto das misturas

	M0-500	M0	M1	M2	M3	M3b	M4	M4b	M5	M6	M7	M8	M9
Custo (€/m³)	849	865	873	865	779	697	725	317	878	883	883	875	939

3 CONCRET_{Top}

O *CONCRET_{Top}* [7] é uma metodologia de decisão multicritério desenvolvida por investigadores do Instituto Superior Técnico – IST com o objetivo de otimizar misturas de betão tradicionais e não tradicionais, avaliando múltiplas características no âmbito do desempenho técnico e do ciclo de vida económico e ambiental. Ao considerar estes requisitos globais, o método aplica diferentes pesos para cada uma das características a serem analisadas, de acordo com o tipo de betão em uso e seus fins de aplicação.

3.1 Análise multicritério

3.1.1 Metodologia

A análise isolada do desempenho ambiental ou económico é limitadora, dado que as misturas não apresentam o mesmo desempenho técnico. Por essa razão, neste estudo, a otimização do material considerou, simultaneamente, fatores de impactes ambientais, custos, desempenho mecânico e de durabilidade, verificando-se que todas as misturas em análise apresentavam características mínimas nestas duas últimas dimensões para poderem ser utilizadas em obra. Portanto, para que houvesse o cruzamento efetivo dos resultados obtidos no estudo destes parâmetros, foi utilizado o método *CONCRET_{Top}*, o qual é descrito em detalhe em publicações internacionais [7;10]. Contudo como foi analisado um número de características inferior ao previsto no método original, houve uma adaptação coerente do mesmo, redistribuindo os pesos de cada uma (Tabela 4).

Com o peso dos parâmetros definidos, as características de cada mistura foram ordenadas do pior para o melhor desempenho em valores normalizados entre 0 e 1, e seguiu-se, então, a aplicação dos pesos a estes valores de modo a obter o fator *CONCRET_{Top}* para cada cenário.

3.1.2 Análise de resultados

O gráfico apresentado na Figura 6 e a Tabela 5 ilustram os resultados obtidos. Apesar de, na situação atual em que é dado maior peso à resistência e ao custo, a mistura M2 ficar posicionada em segundo lugar, esta ainda foi considerada como a solução preferível, uma vez que apresenta o melhor desempenho em mais cenários do que as outras amassaduras avaliadas. De facto, acabam por existir duas misturas com desempenhos dominadores e semelhantes nos cenários sustentável, e durável (M2 e M3b) e nos cenários atuais, resistente e económica (M2 e M5). Assim, conclui-se que a melhor solução de UHPC depende do cenário e das preferências do decisor final, embora a mistura M2 seja a única que ocupa o topo da tabela em todos estes cenários. A estas três, seguem-se as misturas M1, M7 e M8.

A mistura mais barata (M4b) acaba por não se destacar, exceto no cenário durável, devido a ser a que tem maiores impactes ambientais. As misturas de referência M0 (exceto no resistente) e M0-500 (exceto no sustentável), e a mistura M9, acompanham essa mistura na base da tabela para a maioria dos cenários.

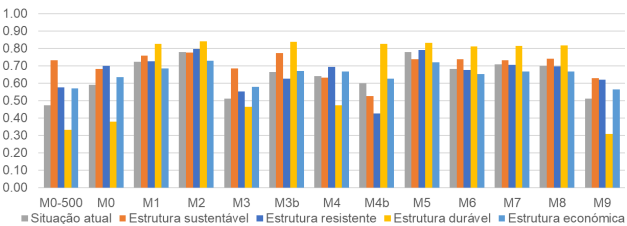


Figura 6 Desempenho das amassaduras em cada cenário

Tabela 4 Definição de pesos para cada cenário

		Situação atual	Estrutura			
			sustentável	resistente	durável	económica
Estado endurecido	Resistência à compressão (MPa)	32%	8%	40%	8%	24%
	Módulo de elasticidade (GPa)	8%	2%	10%	2%	6%
Durabilidade	Resistência penetração cloretos - coef migração Dmédio ($\times 10^{-12}$) m ² /s	20%	10%	10%	50%	10%
Impactes ambientais	GWP (kg CO ₂ eq./m ³)	0%	25%	5%	5%	5%
	PE-NRE (MJ/m ³)	0%	25%	5%	5%	5%
Desempenho económico	Custo (€/m ³)	40%	30%	30%	30%	50%

Tabela 5 Otimização do fator *CONCRETop* das amassaduras para cada cenário

Situação atual		Estrutura							
		sustentável		resistente		durável		económica	
M5	0,78	M2	0,77	M2	0,80	M2	0,84	M2	0,73
M2	0,78	M3b	0,77	M5	0,79	M3b	0,84	M5	0,72
M1	0,72	M1	0,76	M1	0,73	M5	0,83	M1	0,69
M7	0,71	M8	0,74	M7	0,70	M4b	0,83	M3b	0,67
M8	0,70	M6	0,74	M0	0,70	M1	0,82	M7	0,67
M6	0,68	M5	0,74	M8	0,70	M8	0,82	M4	0,67
M3b	0,66	M0-500	0,73	M4	0,69	M7	0,81	M8	0,67
M4	0,64	M7	0,73	M6	0,68	M6	0,81	M6	0,65
M4b	0,60	M3	0,69	M3b	0,63	M4	0,47	M0	0,63
M0	0,59	M0	0,68	M9	0,62	M3	0,46	M4b	0,63
M9	0,51	M4	0,63	M0-500	0,58	M0	0,38	M3	0,58
M3	0,51	M9	0,63	M3	0,55	M0-500	0,33	M0-500	0,57
M0-500	0,47	M4b	0,53	M4b	0,43	M9	0,31	M9	0,56

4 Conclusão

No presente estudo e nas condições atuais de mercado, verifica-se que a mistura de UHPC com menor custo é, no entanto, a que apresenta maior impacto ambiental. Além disso, conclui-se que a melhor solução de UHPC depende do cenário e das preferências do decisor final. De facto, o estudo de sustentabilidade do UHPC de referência e de possíveis soluções alternativas eco-eficientes é imprescindível para proporcionar o eco-design do material que está a ser desenvolvido, uma vez que permite entender as particularidades ligadas a cada tipo de matéria-prima utilizada e identificar as melhorias necessárias para atingir o objetivo de um produto com um bom desempenho ambiental e económico. Por exemplo, verifica-se que:

- O cimento é o componente causador de maior impacto ambiental, seguido pelas microfibras metálicas e pelas fibras poliméricas híbridas;
- O componente de maior contribuição para o custo das misturas são as microfibras metálicas, seguidas das fibras poliméricas híbridas, das macrofibras metálicas, do cimento e do superplastificante.

Conclui-se assim que o desempenho ambiental e económico dos UHPC depende não só da taxa de substituição de cimento por SCMs, mas também da taxa de incorporação absoluta e relativa de fibras metálicas e poliméricas.

Agradecimentos

Este trabalho insere-se na atividade de investigação desenvolvida no Centro de Investigação em Engenharia Civil e Inovação

para a Sustentabilidade (CERIS) e foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) no âmbito do projeto UIDB/04625/2020. Este trabalho recebeu também o apoio financeiro da Agência da Inovação no âmbito do projeto *Pre-Shell* (ANI LISBOA-01-0247-FEDER-039735).

Referências

- [1] ABBAS, S.; NEHDI, M.; SALEEM, M. (2016) – Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, no. 3. Korea Concrete Institute, pp. 271-295, doi: 10.1007/s40069-016-0157-4.
- [2] YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. (2015) – Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses” *Cement & Concrete Composites*, vol. 55, pp. 383-394, doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024.
- [3] KIM, H.; KOH, T.; PYO, S. (2016) – Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags. *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 153-160, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.134.
- [4] LI, P.; BROUWERS, H.; CHEN, W.; YU, Q. (2020) – Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 242, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118112.
- [5] SCHMIDT, M. (2004) – Ultra high performance concrete (UHPC), *proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, September 13 - 15*.
- [6] ABELLÁN-GARCIA, J.; FERNÁNDEZ, J.; CASTELLANOS, N. (2012) – Development of cost-efficient UHPC with local materials in Colombia, *session A6: Ecological and Economic Optimisation, Hipermat*.

- [7] KURDA, R.; de BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. (2019) – CONCRET_{Top} – A multi-criteria decision method for concrete optimization. *Environmental Impact Assessment Review*. 74, pp. 73-85, doi: 10.1016/j.eiar.2018.10.006.
- [8] SILVESTRE, J.D.; LASVAUX, S.; HODKOVA, J.; de BRITO, J.; PINHEIRO, M.D. (2015) – NativeLCA – a systematic approach for the selection of environmental datasets as generic data: application to construction products in a national context. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 20 (6), pp. 731-750, doi: 10.1007/s11367-015-0885-8.
- [9] PARGANA, N.; PINHEIRO, M.D.; SILVESTRE, J.D.; de BRITO, J. (2014) – Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy and Buildings*. 82, pp. 466-481, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.057
- [10] KURDA, R.; de BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. (2019) – CONCRET_{Top} method: Optimization of concrete with various incorporation ratios of fly ash and recycled aggregates in terms of quality performance and life-cycle cost and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*. 226, pp. 642-657, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.070.