







Ecoeficiência de concretos autoadensáveis com resíduo de louça sanitária

Eco-efficiency of self-compacting concrete with sanitary ware waste

Régis Marciano de Souza 
 Yuri Vilas Boas Ortigara 
 Carlos Eduardo Marmorato Gomes 
 Ricardo Rodrigues Magalhães 
 Patricia Stella Pucharelli Fontanini 
 Alessandro Torres Campos 

Resumo

O resíduo de louça sanitária (RLS) é alvitado como uma alternativa ecologicamente ambiental, em substituição aos agregados finos e pedriscos, empregados na produção de concretos autoadensáveis (CAA). A eficiência ambiental nos ciclos de vida energético e das emissões de dióxido de carbono de CAA com diferentes misturas de RLS, foram comparadas com o concreto autoadensável sem RLS (CAA_REF). A Análise do Ciclo de Vida (ACV) evidenciou que a substituição de agregados de RLS em CAA_REF, pode gerar uma redução absoluta de aproximadamente 34,70 MJ/m³ e 2,07 kg de CO₂/m³, respectivamente, o que corresponde a reduções de 1,5% e 0,5%. Verificou-se ainda que o uso de um indicador de ecoeficiência do comportamento ambiental em relação ao parâmetro resistência mecânica à compressão, pode contribuir e ser adequado em projetos de dosagens de CAA. Assim, observou-se que o uso de RLS, pode colaborar para a sustentabilidade ambiental, reduzindo a disposição inadequada dos RLS no meio ambiente e implementado um reuso adequado.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida (ACV). Energia incorporada. Emissões de dióxido de carbono. Concreto sustentável. Concreto autoadensável.

Abstract

Sanitary ware waste (RLS) is proposed as an ecologically environmental alternative, replacing fine aggregates and gravel, used in the production of self-compacting concrete (SCC). The environmental efficiency in energy life cycles and carbon dioxide emissions of SCC with different mixtures of RLS, were compared with the self-compacting concrete without RLS (CAA_REF). The Life Cycle Assessment (LCA) showed that the replacement of RLS aggregates in CAA_REF, can generate an absolute reduction of approximately 45.42 MJ/m³ and 2.67 kg of CO₂/m³ respectively, which corresponds to reductions of 2.2% and 0.6%. It was also verified that the use of an indicator of eco-efficiency of the environmental behavior in relation to the parameter mechanical resistance to compression, can contribute and be adequate in projects of dosages of SCC. Thus, it was observed that the use of RLS can contribute to environmental sustainability, reducing the inadequate disposal of RLS in the environment and implementing an adequate reuse.

Keywords: Life cycle assessment (LCA). Embodied energy. Carbon dioxide emissions. Sustainable concrete. Self-compacting concrete.

Recebido em 03/12/22
 Aceito em 15/12/23

¹Régis Marciano de Souza
¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Pouso Alegre - MG - Brasil

²Yuri Vilas Boas Ortigara
²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Pouso Alegre - MG - Brasil

³Carlos Eduardo Marmorato Gomes
³Universidade Estadual de Campinas Campinas - SP - Brasil

⁴Ricardo Rodrigues Magalhães
⁴Universidade Federal de Lavras Lavras - MG - Brasil

⁵Patrícia Stella Pucharelli Fontanini
⁵Universidade Estadual de Campinas Campinas - SP - Brasil

⁶Alessandro Torres Campos
⁶Universidade Federal de Lavras Lavras - MG - Brasil

Introdução

Os compósitos cimentícios estão entre os materiais mais utilizados em todo mundo. Seu processo de produção consome grandes quantidades de recursos naturais, demanda grande quantidade de energia e gera montantes relevantes de gases geradores do efeito estufa (GGE), principalmente de dióxido de carbono. Pesquisas que buscam a melhoria tecnológica dos compósitos cimentícios, visando reduzir os impactos ambientais, cada vez mais tem recebido a atenção dos pesquisadores (Koenders; Pepe; Martinelli, 2014).

A indústria de concreto, em especial a de concreto autoadensável (CAA), apresenta-se com grande potencial para substituição de matérias primas naturais e cimento por resíduos de outros setores produtivos. A adição de materiais alternativos na composição de CAA, visa atender a requisitos técnicos, econômicos e ambientais (Gesoglu *et al.*, 2017; Sua-Iam; Makul, 2017).

Segundo Metha e Monteiro (2014), o CAA difere do concreto convencional, principalmente por apresentar características reológicas melhoradas. Um concreto para ser considerado autoadensável deve apresentar simultaneamente fluidez, habilidade passante e resistência à segregação (Costa; Cabral, 2019). As amplas possibilidades de aplicação, com vantagens sobre o concreto convencional, fazem que o CAA ganhe cada vez mais espaço na indústria da construção (Sharma; Khan, 2018).

O uso do CAA permite a obtenção de superfícies lisas com bom acabamento e o preenchimento completo de formas com geometrias complexas sem a necessidade de vibração (Tennich; Kalle; Ben Ouezdou, 2015). Assim, o CAA pode ser utilizado para melhorar a eficiência do processo de concretagem de elementos de concreto com altas taxas de armaduras ou estreitos, e garantir que o concreto preencha todas as regiões concretadas com pouca ou nenhuma segregação (Sua-Iam; Makul, 2017).

O Brasil está entre os 5 maiores produtores de louça sanitárias do mundo, com produção anual de 22 milhões de peças (ANFACER, 2021). Segundo Cabral Junior *et al.* (2019), peças reprovadas após a queima, sem a possibilidade de reparo, representam uma das principais perdas para as indústrias. O volume de perdas representa entre 6%, para plantas mais eficientes e 20% para plantas menos eficientes do total de peças produzidas (Cabral Junior *et al.*, 2010). Estes resíduos, denominados de refugos queimados, cacos, ou ainda *pitcher*, em sua maioria são descartados em aterros sanitários, o que gera um grande passivo ambiental. Neste trabalho, estes resíduos serão denominados por resíduos de louça sanitária (RLS).

O uso de RLS em concretos vem sendo debatido pela comunidade acadêmica, com foco na melhoria das propriedades físicas do concreto, bem como os possíveis ganhos ambientais e econômicos. Para Almeida *et al.* (2019), os concretos com RLS apresentam resistências à compressão satisfatórias, incluindo a dosagem com 100% de RLS. Outro aspecto observado nos modos de ruptura dos corpos de prova foi a pequena adesão entre o resíduo de louça sanitária e a argamassa devido à camada de esmalte no contorno do resíduo (Almeida *et al.*, 2019).

Embora estes trabalhos cite possíveis ganhos ambientais com a incorporação dos resíduos, não foram encontrados artigos que de fato quantifiquem estes ganhos. Para Shoaie *et al.* (2020), De Souza, Magalhães e Campos (2021) e De Souza *et al.* (2022), o quantitativo dos materiais agregados em diferentes dosagens podem ter o seu impacto ambiental avaliado pela energia incorporada (embutida) e correspondentes emissões de dióxido de carbono (CO₂), informação corroborada por Mithun e Narasimhan (2016), Chastas *et al.* (2018) e Huang, Huang e Marcotullio (2019). Contudo, para De Wolf, Pomponi e Moncaster (2017), embora exista uma relação entre o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono (CO₂), eles não são considerados equivalentes, o que reforça a importância de estudo combinado destes indicadores.

As demandas de energia e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) são de grande importância para as construções em concreto, e podem ser mensurados pela Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e pela Avaliação do Ciclo de Vida das Emissões de CO₂ (ACVCO₂). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia apropriada para avaliação ambiental quantitativa de materiais (Souza; Magalhães; Campos, 2021; De Souza *et al.*, 2022).

O trabalho propõe mensurar os impactos ambientais nos ciclos de vida energético e das emissões de CO₂, de acordo com os procedimentos padronizados da ACV, propostos pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b). Desse modo, essa pesquisa propõe verificar se de acordo com ACVE e ACVCO₂, existe algum ganho ambiental na substituição de agregado natural por RLS, proposta original e promissora no estudo da sustentabilidade ambiental de concretos.

Materiais e métodos

O desenvolvimento metodológico desta pesquisa foi estruturado da seguinte forma:

- (a) 1º Parte: apresentação das características dos materiais adotados;
- (b) 2º Parte: estabelecimento das dosagens de CAA, classificações e ensaios, e;
- (c) 3º Parte: estruturação da avaliação do comportamento ambiental nos ciclos de vida energético e das emissões de dióxido de carbono, respectivamente ACVE e ACVCO₂.

Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados para fabricação dos concretos foram: Cimento Portland tipo CP-V – ARI (ABNT, 2018a), aditivo redutor de água MC-TechniFlow 520 do tipo II (ABNT, 2019), água da rede municipal de abastecimento e agregados em diferentes faixas granulométricas de origem naturais e reciclados da indústria de louça sanitária, segundo dados da Tabela 1.

Os RLS foram obtidos partir de peças de louças sanitárias que após o processo de queima para fabricação não foram aprovadas no controle de qualidade, sendo destruídas para descarte, Figura 1. Estes resíduos são compostos em sua maior parte, (cerca de 70%) por dióxido de silício (SiO₂), segundo ensaio de fluorescência de raios - x realizado no laboratório de Geoanálítica da USP.

Dosagens de CAA

Foram preparadas nove dosagens de concreto, divididas em duas fases, conforme nomenclatura da Figura 2. Partindo da dosagem de referência CAA_REF (0% de RLS), inicialmente foram feitas substituições em volume de 20, 40, 60 e 80% da areia fina por RLS moído, estas misturas foram denominadas de CAA_20, CAA_40, CAA_60 e CAA_80, respectivamente. Foram mantidas as proporções de todos os demais componentes das misturas. Vale destacar que o RLS moído é muito mais fino que o agregado miúdo (areia fina), o que pode contribuir para absorção de água e em alterações na trabalhabilidade das misturas.

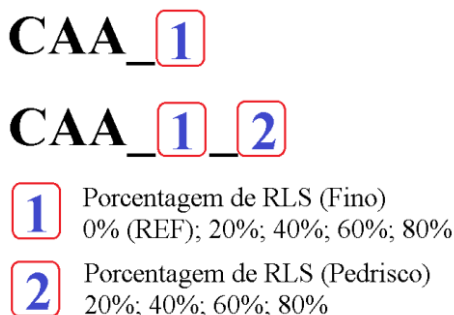
Tabela 1 - Dimensões dos agregados utilizados nas misturas

Agregado	D _{máx}	Módulo de Finura
Areia fina natural quartzosa	0,60 mm	2,98
Areia média natural quartzosa	4,75 mm	4,17
Brita basáltica	19,00 mm	8,95
Pedrisco basáltico	9,50 mm	7,68
RLS britado	12,70 mm	4,94
RLS moído	Diâmetro médio das partículas 15,4µm	

Figura 1 - Resíduos de louça sanitária britado (esquerda) e moído (direita)



Figura 2 - Nomenclatura das dosagens de CAA



Num segundo momento, utilizou-se uma dosagem que atendesse aos critérios para concreto autoadensável, segundo recomendação da norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) e que contivesse a maior quantidade de resíduos. A dosagem CAA_80 foi responsável pelo maior índice de agregado fino de RLS. No entanto, no estado fresco, não alcançou o limite mínimo para espalhamento e não alcançou os limites mínimos para habilidade passante exigidos pela norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017a). Assim, foi adotado a dosagem CAA_40 (40% de agregado fino de RLS) como referência para realização das substituições de pedrisco por RLS britado, fixando o consumo dos demais componentes. Partindo da mistura CAA_40, foram realizadas substituições em volume de 20, 40, 60 e 80% de RLS por pedrisco, estas misturas foram nominadas de CAA_40_20, CAA_40_40, CAA_40_60 e CAA_40_80 respectivamente. O quantitativo dos materiais por metro cúbico de concreto autoadensável foi disposto na Tabela 2.

Para cada uma das dosagens foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm). Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura por imersão em água por 28 dias, quando foram removidos para realização do ensaio de determinação da resistência à compressão axial. A determinação resistência à compressão axial dos CAA(s) seguiu o procedimento estabelecido na norma NBR 5739 (ABNT, 2018b).

Avaliação ambiental das dosagens

O método de ACV proposto se baseia nas recomendações das normas NBR ISO 14040 (ABNT 2014a) e NBR ISO 14044 (ABNT 2014b). Para alcançar os objetivos propostos, adotou-se a seguinte estrutura, conforme proposto pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a):

- (d) definição do objetivo e escopo;
- (e) análise do inventário das emissões de carbono e energia;
- (f) avaliação de impacto no ciclo de vida das dosagens propostas; e
- (g) interpretação, análise e discussão dos resultados da ACV.

A função objeto de investigação é produzir concretos autoadensáveis com resíduo de louça sanitária. Para esse fim, adotou-se como unidade funcional uma unidade de volume de concreto autoadensável no Sistema Internacional de Unidades (1 m³), considerando a disposição e fronteiras do sistema (Figura 3).

Foi realizado ACVE e ACVCO₂ do berço ao portal (*grade-to-gate*), considerando as fases de extração, transporte, fabricação, montagem, desmontagem e desconstrução, para o ciclo de vida da produção das dosagens dos concretos autoadensáveis, análogo à concepção de Mithun e Narasimhan (2016), Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016), Souza, Magalhães e Campos (2021) e De Souza *et al.* (2022).

Avaliou-se o impacto ambiental individual dos componentes cimento *Portland* CP-V – ARI, areia fina, areia média, pedrisco, brita, água e aditivo redutor de água MC-TechniFlow 520 de cada uma das dosagens propostas, tal como realizado por Zeitz, Griffin e Dusicka (2019), León-Velez e Guillén-Mena (2020) e Brunetta *et al.* (2021). Para esse fim, foi estabelecido um inventário principal das emissões de carbono e energia incorporada, com o intuito de realizar a ACVE e a ACVCO₂, dos componentes das dosagens de CAA, conforme dados das Tabela 3. O inventário foi preparado com base nas pesquisas de Hammond e Jones (2011), Mithun e Narasimhan (2016), Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016), Paz (2020), Souza, Magalhães e Campos (2021) e De Souza *et al.* (2022) e Oliveira e John (2022).

Tabela 2 - Quantitativo de materiais por metro cúbico de concreto das dosagens analisadas

Dosagem	Cimento Portland (kg/m ³)	Agregado Fino		Areia Média (kg/m ³)	Pedrisco		Brita (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
		Areia (kg/m ³)	RLS (kg/m ³)		Rocha (kg/m ³)	RLS (kg/m ³)			
CAA_REF	436	281,22	0,00	624,79	546,74	0,00	234,13	239,36	3,49
CAA_20	436	224,98	58,77	624,79	546,74	0,00	234,13	239,36	3,49
CAA_40	436	168,73	117,53	624,79	546,74	0,00	234,13	239,36	3,49
CAA_60	436	112,49	176,30	624,79	546,74	0,00	234,13	239,36	3,49
CAA_80	436	56,24	235,06	624,79	546,74	0,00	234,13	239,36	3,49
CAA_40_20	436	168,73	117,53	624,79	437,40	86,38	234,13	239,36	3,49
CAA_40_40	436	168,73	117,53	624,79	328,05	172,76	234,13	239,36	3,49
CAA_40_60	436	168,73	117,53	624,79	218,70	259,14	234,13	239,36	3,49
CAA_40_80	436	168,73	117,53	624,79	109,35	345,52	234,13	239,36	3,49

Figura 3 - Fronteira do sistema de produção de concreto autoadensável com resíduo de louça sanitária

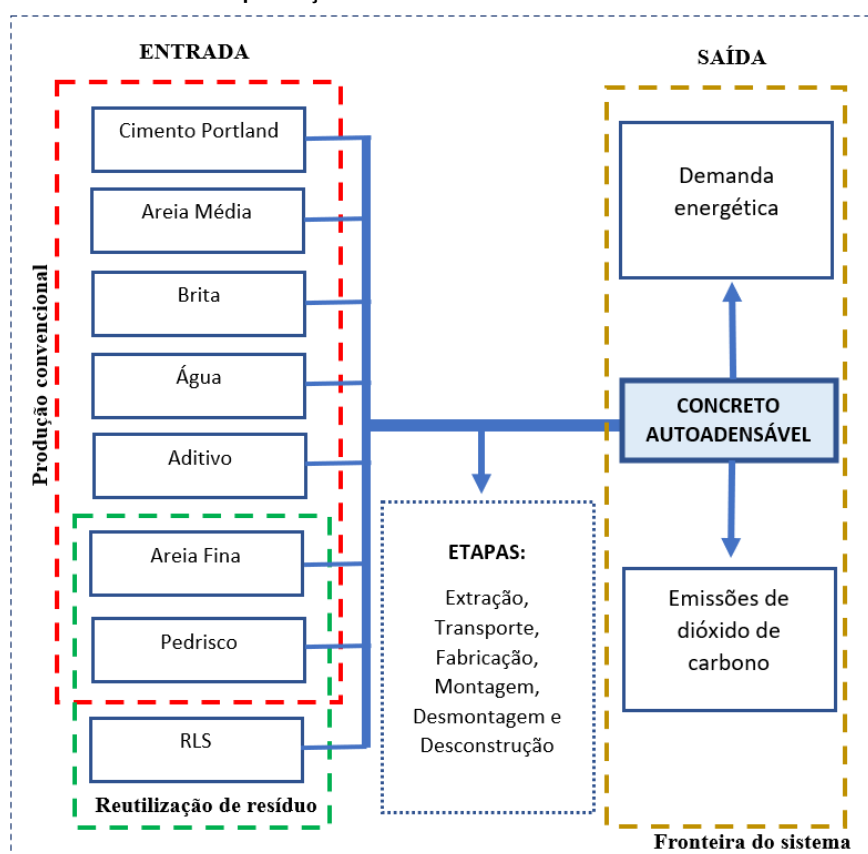


Tabela 3 - Inventário principal das emissões de carbono e energia incorporada

Componente	Emissões de CO ₂ (kg de CO ₂ eq./kg)	Energia Incorporada (MJ/kg)	Literatura
Cimento Portland	0,93	4,80	[2], [3], [4] e [5]
Areia Fina e Média	0,0051	0,0810	[1], [2], [3], [4] e [5]
Pedrisco e Brita	0,0048	0,0830	[1], [2], [3], [4] e [5]
Água	0,0008	0,2000	[2], [3] e [4] e [5]
Aditivo Redutor de Água	0,60	11,50	[2] e [3]
Agregado Fino de RLS	0,00131 ^[6]	0,003 ^[7]	[6] e [7]
Pedrisco de RLS	0,00129 ^[6]	0,003 ^[7]	[6] e [7]

Nota: [1] Hammond e Jones (2011), [2] Mithun e Narasimhan (2016), [3] Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016), [4] Souza, Magalhães e Campos (2021), [5] De Souza *et al.* (2022), [6] Paz (2020) e [7] Oliveira e John (2022).

Resultados e discussões

Na Tabela 4, são apresentadas as classificações dos concretos de acordo com os ensaios realizados no estado fresco, conforme critérios da norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017a). Destaca-se que o concreto CAA_80 não atingiu o limite mínimo para espalhamento e os concretos CAA_60 e CAA_80 não atingiram os limites mínimos para habilidade passante exigidos pela norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) para serem considerados como concretos autoadensáveis. Esse comportamento das dosagens CAA_60 e CAA_80 pode ser devido ao alto teor de material fino de RLS em substituição ao agregado fino (areia), contribuindo para aumento da superfície específica e correspondente absorção de água.

Entretanto, estas misturas, assim como todas as demais apresentam características para utilização em elementos estruturais em ambientes com grau de agressividade III, conforme preconiza a norma NBR 12655 (ABNT, 2015). A Figura 4 mostra o aspecto físico dos CAA(s) no estado fresco, com as diferenças de consistência e aspectos pertinentes à presença de RLS em relação ao valor de referência (CAA_REF).

Com o objetivo de analisar a atividade ambiental das dosagens, foi quantificado o aporte energético (Tabela 5) e as emissões de dióxido de carbono (Tabela 6) das misturas propostas. Constatou-se que a dosagem com maior impacto no custo energético também é responsável pelo maior quantitativo de emissões de dióxido de carbono.

A dosagem CAA_REF, sem a incorporação de RLS, apresentou maiores impactos ambientais na demanda energética e nas emissões de dióxido de carbono. Informação corroborada por Alsalman *et al.* (2021), ao mencionar os efeitos mínimos dos agregados, da cura do concreto e dos aditivos na energia e nas emissões de CO₂.

Desta forma, infere-se que o uso de RLS pode ser uma alternativa promissora para redução dos impactos ambientais em concretos autoadensáveis. Além do benefício da reutilização dos RLS, a substituição de agregados de RLS em CAA_REF, na dosagem CAA_40_80, gerou uma redução absoluta de aproximadamente 34,70 MJ/m³ e 2,07 kg de CO₂/m³, equivalente respectivamente, a 1,5% e 0,5% da dosagem de referência.

Tabela 4 - Classificação dos concretos no estado fresco

Dosagem	Espalhamento	IEV	Viscosidade plástica	Viscosidade plástica	Habilidade passante	
	NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)		NBR 15823-5 (ABNT, 2017c)		NBR 15823-3 (ABNT, 2017d)	NBR 15823-4 (ABNT, 2017e)
CAA_REF	SF 2	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_20	SF 2	I	VS 1	VF 1	PJ 1	PL 1
CAA_40	SF 2	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_60	SF 1	I	VS 1	VF 1	Não atingiu	Não atingiu
CAA_80	Não atingiu	0	VS1	VF2	Não atingiu	Não atingiu
CAA_40_20	SF 3	I	VS 1	VF 1	PJ 1	PL 1
CAA_40_40	SF 3	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_40_60	SF 3	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_40_80	SF 3	I	VS 1	VF 2	PJ2	PL 1

Figura 4 - Aspectos dos concretos autoadensáveis no estado fresco

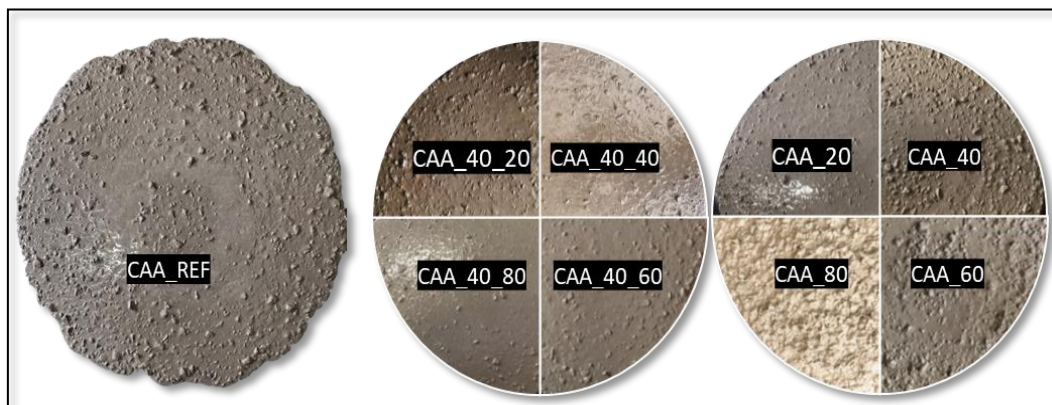


Tabela 5 - Atividade ambiental do aporte energético das dosagens

Dosagem	Energia Incorporada (MJ)									
	Cimento Portland	Agregado Fino		Areia Média	Pedrisco		Brita	Água	Aditivo	Total
		Areia	RLS		Rocha	RLS				
CAA_REF	2092,80	22,78	0,00	50,61	45,38	0,00	19,43	47,87	40,14	2319,01
CAA_20	2092,80	18,22	0,18	50,61	45,38	0,00	19,43	47,87	40,14	2314,63
CAA_40	2092,80	13,67	0,35	50,61	45,38	0,00	19,43	47,87	40,14	2310,25
CAA_60	2092,80	9,11	0,53	50,61	45,38	0,00	19,43	47,87	40,14	2305,87
CAA_80	2092,80	4,56	0,71	50,61	45,38	0,00	19,43	47,87	40,14	2301,49
CAA_40_20	2092,80	13,67	0,35	50,61	36,30	2,59	19,43	47,87	40,14	2303,76
CAA_40_40	2092,80	13,67	0,35	50,61	27,23	5,18	19,43	47,87	40,14	2297,28
CAA_40_60	2092,80	13,67	0,35	50,61	18,15	7,77	19,43	47,87	40,14	2290,79
CAA_40_80	2092,80	13,67	0,35	50,61	9,08	10,37	19,43	47,87	40,14	2284,31

Tabela 6 - Atividade ambiental das emissões de dióxido de carbono das dosagens

Dosagem	Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente (kg de CO ₂)									
	Cimento Portland	Agregado Fino		Areia Média	Pedrisco		Brita	Água	Aditivo	Total
		Areia	RLS		Rocha	RLS				
CAA_REF	405,48	1,43	0,00	3,19	2,62	0,00	1,12	0,19	2,09	416,13
CAA_20	405,48	1,15	0,08	3,19	2,62	0,00	1,12	0,19	2,09	415,92
CAA_40	405,48	0,86	0,15	3,19	2,62	0,00	1,12	0,19	2,09	415,71
CAA_60	405,48	0,57	0,23	3,19	2,62	0,00	1,12	0,19	2,09	415,50
CAA_80	405,48	0,29	0,31	3,19	2,62	0,00	1,12	0,19	2,09	415,29
CAA_40_20	405,48	0,86	0,15	3,19	2,10	0,11	1,12	0,19	2,09	415,30
CAA_40_40	405,48	0,86	0,15	3,19	1,57	0,22	1,12	0,19	2,09	414,89
CAA_40_60	405,48	0,86	0,15	3,19	1,05	0,33	1,12	0,19	2,09	414,47
CAA_40_80	405,48	0,86	0,15	3,19	0,52	0,45	1,12	0,19	2,09	414,06

Evidências e implicações

Diante dos resultados de ACVE e ACVCO₂, as misturas com incorporação de RLS demonstraram potencial para atuar como alternativa ecologicamente ambiental para reutilização desses resíduos. Verificou-se que o uso de RLS em CAA, pode contribuir para a sustentabilidade ambiental, diminuindo a disposição inadequada desses RLS no meio ambiente e implementado um incremento de vida útil para estes resíduos, denominados de refugos queimados, cacos, ou ainda *pitcher*, que correspondem em torno de 6 a 20% do total de peças produzidas (Cabral Junior *et al.*, 2010).

Identificou-se por meio da relação entre energia incorporada e as correspondentes emissões de dióxido de carbono, que as dosagens propostas apresentam uma demanda energética média de 5,55 MJ por kg de CO₂ emitido, com uma abrangência de 5,52 (mínimo) a 5,57 (máximo) MJ por kg de CO₂.

De maneira geral, a adição de RLS em CAA mostrou ser uma boa alternativa na produção de concretos com resistência mecânica à compressão satisfatórias, informação confirmada por Almeida *et al.* (2019). As misturas CAA_REF, CAA_20, CAA_40, CAA_60 e CAA_80 apresentaram resistência à compressão axial superiores à 30 MPa aos 28 dias. Em quanto as misturas CAA_40_20, CAA_40_40, CAA_40_60 e CAA_40_80 apresentaram resistências à compressão axial superiores à 25 MPa aos 28 dias, conforme dados dos eixos das abscissas da Figura 5.

Ainda, neste estudo de incorporação de RLS em CAA, observou-se que a eficiência ambiental (EA), pode ser avaliada por meio da relação entre o parâmetro ambiental (energia e/ou emissões de dióxido de carbono) e a resistência mecânica à compressão (Equação 1), procedimento adotado por Alsalmán *et al.* (2021).

$$EA = \frac{\text{Parâmetro ambiental}}{\text{Resistência mecânica à compressão}} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

EA é a eficiência ambiental em MJ/MPa ou kg de CO₂/MPa em relação às propriedades mecânicas de resistência à compressão;

Resistência mecânica à compressão em MPa; e

Parâmetro ambiental pode ser o impacto energético ou as emissões de CO₂, MJ ou kg de CO₂, respectivamente.

A eficiência ambiental proposta, representa quanto de impacto ambiental corresponde a uma unidade de resistência mecânica à compressão. Neste sentido, quanto maior o valor numérico de EA, maior é o impacto ambiental associado. Dessa forma, a dosagem CAA_20 pode ser considerada, dentre as opções, a solução ecologicamente mais eficiente, apresentando uma redução no impacto ambiental de cerca de 26% em relação a dosagem CAA_40_40 e de aproximadamente 10% em relação à dosagem de referência (CAA_REF). Observou-se notável uniformidade no intervalo entre desempenho ambiental energético e as emissões de carbono das dosagens (Figura 5), de forma que é possível converter EA (MJ/MPa) para EA (kg de CO₂/MPa) acrescentando um valor médio de 6,37 (kg de CO₂/MPa) ao valor numérico conhecido de EA (MJ/MPa), Equação 2:

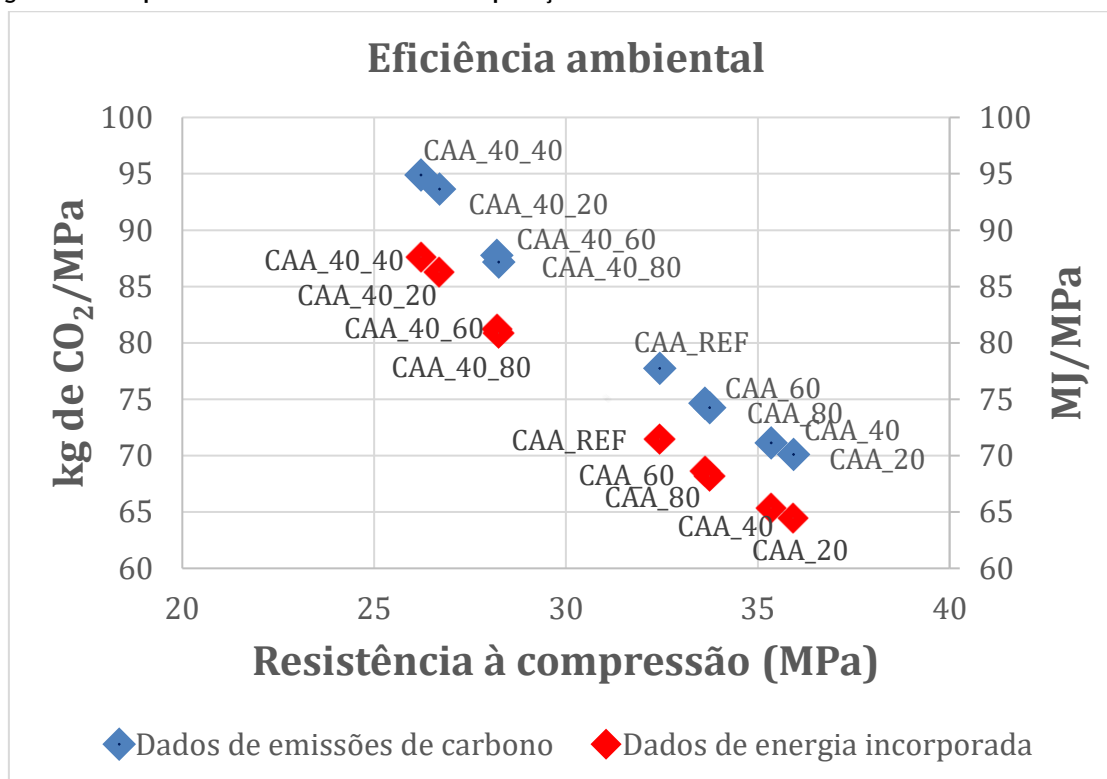
$$EA \left(\text{kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{MPa}} \right) = EA \left(\frac{\text{MJ}}{\text{MPa}} \right) \times 1 \left(\text{kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{MJ}} \right) + 6,37 \left(\text{kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{MPa}} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

EA é a eficiência ambiental em MJ/MPa ou kg de CO₂/MPa em relação à propriedade mecânica de resistência à compressão.

Desse modo, a Figura 5, também representa o decréscimo linear das emissões de CO₂ que ocorreram com o aumento dos valores de resistência mecânica axial à compressão (MPa). O mesmo comportamento foi verificado com relação ao impacto ambiental da demanda energética, Figura 5. O que expõe indicadores de uma significativa interferência das propriedades mecânicas na energia incorporada e nas emissões de dióxido de carbono em CAA(s).

Ressalta-se que o quantitativo dos materiais incorporados nas misturas, pode afetar de forma substancial a demanda energética e as emissões de CO₂ de concretos, assim como observado por Alsaman *et al.* (2021). Um melhoramento do desempenho ambiental pode ser alcançado escolhendo dosagens de forma adequada, podendo chegar a uma redução do custo energético da ordem de aproximadamente 25% em concretos convencionais, conforme relatado por Souza, Magalhães e Campos (2021). No cenário das emissões de CO₂, esse valor pode ser ainda maior, chegando a uma atenuação de até 31,41%, segundo dados De Souza *et al.* (2022).

Figura 5 - Comportamento ambiental da incorporação de RLS em CAA



Verificou-se que o cimento é o material com maior impacto ambiental associado, informação também relatada por Wang *et al.* (2017), sendo responsável por 90,9% da energia e 97,7% das emissões de dióxido de carbono dos CAA. Para Alsalmán *et al.* (2021), essas contribuições podem ser menores, aproximadamente 80% da energia e 91% das emissões de CO₂. O uso de concreto ativado por álcali, pode ser uma boa alternativa ao uso do concreto de cimento Portland comum, pois pode apresentar benefícios eco sustentáveis ao meio ambiente (Alsalmán *et al.*, 2021). Os valores correspondentes da contribuição do cimento Portland, tendem a alcançar uma maior compatibilidade quando se utiliza inventários semelhantes. Neste contexto, os dados observados por De Souza *et al.* (2022), afirmaram que o cimento contribui com um valor médio de 98,40% do total das emissões de CO₂. O que se deve provavelmente ao fato da semelhança entre os processos metodológicos, em especial com relação à escolha do período da fase de vida do produto e a compatibilidade dos dados do inventário de ACV.

Embora os resultados demonstrem a eficiência na reutilização adequada dos RLS e a possibilidade de redução dos impactos ambientais de diferentes misturas de CAA, trabalhos futuros podem explorar diferentes concentrações dos componentes empregados para avaliar novas iterações e outros parâmetros ambientais.

Não obstante, é importante reforçar que neste estudo, não ocorreu uma relação direta entre a dosagem com maior impacto ambiental e a eficiência da dosagem em relação à resistência mecânica à compressão axial, o que pode estar ligado ao consumo de cimento que gera muitos impactos ambientais, a presença de RLS e sua relação com a absorção de água, e com isso uma alteração direta na resistência mecânica à compressão. Por exemplo, neste enquadramento a dosagem CAA_40_80 apresentou menor demanda energética e menores emissões de CO₂. No entanto, seu desempenho em relação a resistência à compressão emitiu mais gases e demandou mais energia que a dosagem de referência (CAA_REF), conforme mostra a Figura 5. O que de certa forma reforça a ideia de uma avaliação conjunto desses indicadores.

Nota-se, Figura 5, que as dosagens sem pedrisco de RLS (CAA_20, CAA_40, CAA_60 e CAA_80), apresentaram melhores resultados com relação a eficiência ambiental, o que se deve provavelmente à incorporação do pedrisco de RLS nas dosagens CAA_40_20, CAA_40_40, CAA_40_60 e CAA_40_80. Embora as dosagens mantenham uma mesma relação água-cimento, a incorporação de pedrisco de RLS contribuíram para uma considerável redução da resistência mecânica à compressão. Por outro lado, a presença de uma substituição de 20% de agregado fino (areia) por RLS (fino), apresentou-se de forma mais eficiente, favorecendo ao empacotamento da mistura e um melhor desempenho mecânico. No entanto, ao elevar a porcentagem desse material fino de RLS, a eficiência ambiental foi reduzida na medida que ocorreram adições de RLS.

Conclusões

Buscou-se avaliar a reutilização de resíduo de louça sanitária (RLS) em substituição aos agregados finos e pedriscos, na produção de concretos autoadensáveis (CAA), considerando os impactos das Avaliações do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e das Emissões de CO₂ (ACVCO₂), destacam-se as seguintes conclusões.

A incorporação do RLS em CAA provou ser uma solução viável que facilita o reuso benéfico do RLS e minimiza o descarte inadequado desses resíduos. Por outro lado, os resultados demonstrados pela reutilização de RLS mostram que a substituição de agregados naturais por RLS pode reduzir ligeiramente o impacto ambiental da mistura (energia e emissões de CO₂), principalmente devido ao papel de destaque do cimento no impacto ambiental de concretos.

Infere-se que o uso de um indicador de eficiência do comportamento ambiental, por meio da relação entre o parâmetro ambiental (energia e/ou emissões de dióxido de carbono) e a resistência mecânica à compressão, pode ser empregado como uma ferramenta auxiliar na tomada de decisões em projetos sustentáveis de dosagens para CAA. A combinação de procedimentos convencionais de tecnologia de dosagens de CAA com a abordagem de eficiência ambiental, é capaz de facilitar o entendimento que cada componente da mistura exerce nos impactos ambientais e sua relação com o comportamento resistente à compressão.

Constatou-se que não existe uma proporção direta entre os indicadores de impacto ambiental (energia e emissões de CO₂) e a eficiência ambiental em relação a resistência mecânica à compressão, o que reforça ainda mais a ideia de uma avaliação conjunta desses indicadores em projetos de dosagens. Conclui-se ainda que uma substituição parcial adequada de RLS em CAA pode gerar uma redução do impacto ambiental associado ao parâmetro resistência mecânica à compressão axial em aproximadamente 26% em comparação com outras misturas propostas e em 10% em relação à dosagem de referência.

Referências

- ALMEIDA, D. H. de *et al.* Properties of concrete manufactured with use of ceramic sanitary ware waste as aggregate. **Matéria**, v. 24, n. 2, jun. 2019.
- ALSALMAN, A. *et al.* Energy and CO₂ emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland cement concrete: a comparative analysis of different grades of concrete. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100047, dez. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: concreto autoadensável: classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: concreto autoadensável: determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual: método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: concreto autoadensável: determinação da habilidade passante: método do anel J. Rio de Janeiro, 2017d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: concreto autoadensável: determinação da habilidade passante: métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017e.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável: determinação da viscosidade: método do funil V. Rio de Janeiro, 2017c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Brasil. Rio de Janeiro, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS. **Louças sanitárias e congêneres**. Números do setor. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>. Acesso em: 6 dez. 2021.
- BRUNETTA, R. F. da S. *et al.* Life cycle energy assessment and carbon dioxide emissions of wall systems for rural houses. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 37–50, jan./mar. 2021.
- CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: parte III – indústrias de coloríficos, sanitários e cerâmica técnica - isoladores. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 3, p. 15–26, set. 2019.
- CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Panorama da indústria cerâmica de sanitários no Brasil. **Cerâmica Industrial**, v. 15, p. 12-18, dez. 2010.
- CHASTAS, P. *et al.* Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: a review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings. **Building and Environment**, v. 130, p. 212–226, fev. 2018.
- COSTA, A. C. S. de S.; CABRAL, A. E. B. Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 289-301, out./dez. 2019.
- DE SOUZA, R. M. *et al.* Modelo neuro-fuzzy para previsão das emissões de CO₂ de dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 321–334, out./dez. 2022.

- DE WOLF, C.; POMPONI, F.; MONCASTER, A. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 68–80, abr. 2017.
- GESOGLU, M. *et al.* Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 562–569, jun. 2017.
- HAMMOND, G.; JONES, C. A. Embodied carbon: the Inventory of Carbon and Energy (ICE). Bracknell: BSRIA, 2011.
- HUANG, P. J.; HUANG, S. L.; MARCOTULLIO, P. J. Relationships between CO₂ emissions and embodied energy in building construction: a historical analysis of Taipei. **Building and Environment**, v. 155, p. 360–375, May 2019.
- KOENDERS, E. A. B.; PEPE, M.; MARTINELLI, E. Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 203–212, fev. 2014.
- LEÓN-VELEZ, A.; GUILLÉN-MENA, V. Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 611–625, jul./set. 2020.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 837–844, jan. 2016.
- OLIVEIRA, L. S.; JOHN, V. M. Relatório de coleta de dados para o sistema de informação do desempenho ambiental da construção: agregado reciclado. São Paulo: Sidac, 2022.
- PALANKAR, N.; RAVI SHANKAR, A. U.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 437–448, ago. 2016.
- PAZ, C. F. **Inventário do ciclo de vida aplicado à produção de agregados a partir de resíduos de construção e demolição**. Medianeira, 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2020.
- SHARMA, R.; KHAN, R. A. Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1171–1186, jan. 2018.
- SHOAEI, P. *et al.* Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: A comprehensive comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118991, ago. 2020.
- SOUZA, R. M. de; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T. Modelo neuro-fuzzy para predição do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 295–309, abr./jun. 2021.
- SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Incorporation of high-volume fly ash waste and high-volume recycled alumina waste in the production of self-consolidating concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 159, p. 194–206, ago. 2017.
- TENNICH, M.; KALLEL, A.; BEN OUEZDOU, M. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 65–70, 30 ago. 2015.
- WANG, J. *et al.* Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1162-1174, 2017.
- ZEITZ, A.; GRIFFIN, C. T.; DUSICKA, P. Comparing the embodied carbon and energy of a mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 126–133, set. 2019.

Agradecimentos

Agradecimentos ao IFSULDEMINAS, UNICAMP e UFLA pelo apoio na realização desta pesquisa.

Régis Marciano de Souza

Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e Edição.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas | Campus Pouso Alegre | Av. Maria da Conceição Santos, 900, Parque Real | Pouso Alegre - MG - Brasil | CEP 37550-000 | Tel.: (35) 3427-6600 | E-mail: regis.souza@ifsuldeminas.edu.br

Yuri Vilas Boas Ortigara

Conceitualização, Curadoria de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e Edição.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas | Pouso Alegre - MG - Brasil | E-mail: yuri.ortigara@ifsuldeminas.edu.br

Carlos Eduardo Marmorato Gomes

Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e Edição.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Construção | Universidade Estadual de Campinas | Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária | Campinas - SP - Brasil | CEP 13083-889 | Tel.: (19) 3521-2314 | E-mail: cemgomes@unicamp.br

Ricardo Rodrigues Magalhães

Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e Edição.

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Campus Universitário | Lavras - MG - Brasil | CEP 37200-900 | Tel.: (35) 3829-5234 | E-mail: ricardorm@ufla.br

Patrícia Stella Pucharelli Fontanini

Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e Edição.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Construção | Universidade Estadual de Campinas | Tel.: (19) 3521-2469 | E-mail: pspucha@unicamp.br

Alessandro Torres Campos

Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e Edição.

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Campus Universitário | Tel.: (35) 3829-1486 | E-mail: campos@ufla.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.