

ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE CONCRETOS ECOAMIGÁVEIS COM AGREGADO RESIDUAL DE DEMOLIÇÃO E POZOLANA

LIFE CYCLE COST ANALYSIS OF ECO-FRIENDLY CONCRETE WITH RESIDUAL DEMOLITION AGREGATE AND POZZOLAN.

GUILHERME DANEZI PICCINI | UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

CRISTIANE CARINE DOS SANTOS, DRa. | UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

ANDRÉ LÜBECK, DR. | UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

GERALDO CEHELLA ISAIA, DR. | UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

RESUMO

A construção civil destaca-se por ser um setor com elevado impacto ambiental. Nessa indústria, o concreto é um dos principais protagonistas devido ao grande volume empregado e a demanda de recursos naturais não renováveis para a sua produção. Diante disso, esta pesquisa objetiva estudar o impacto ambiental e o custo de diferentes alternativas de concreto eco amigáveis, compostos por dois tipos de cimento (CP IV e CP V-ARI), pozolana da cinza da casca de arroz (CCA) e teores distintos de resíduos de construção e demolição (RCD). Para isso, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e de carbonatação acelerada, que em conjunto à avaliação do ciclo de vida modular (ACV-m) e ao levantamento de custos, permitiram uma análise integrada comparativa das diferentes misturas de concreto em termos ambientais, econômicos e estruturais. A presença de RCD em misturas com CP IV não foi benéfica, uma vez que diminuiu consideravelmente a vida útil das amostras. Ao realizar a avaliação unitária de custo e de impactos ambientais, a mistura que continha maior concentração de RCD (30%) e cimento CP IV apresentou o pior desempenho. A substituição de cimento por CCA só foi positiva em misturas com baixo teor de RCD (até 15%). Por fim, a alternativa que apresentou a melhor integração impacto ambiental versus custo foi a que continha 15% de RCD, cimento CP V-ARI e nenhuma adição pozolânica.

PALAVRAS CHAVE

Resíduos de Construção e Demolição; Custos; Impactos ambientais.

ABSTRACT

The civil construction stands out as a sector with a high environment impact. In this industry, concrete is the main protagonist due to the large volume and the demand of a non-renewable natural resources for its production. Therefore, this work aims to study the environment impact and the costs of different alternatives of eco-friendly concrete, composed by two types of cement (CP IV and CP V-ARI), rice husk ash pozzolan (RHA) and different rates of construction and demolition waste (CDW). Tests of axial compression stress and accelerated carbonation were performed in order to enable the modular life cycle evaluation and the costs estimation. The results allowed an integrated comparative analysis of different concrete mixtures in terms of environmental, economic and structural performance. The presence of CDW in mixtures with CP IV was not beneficial, as it considerably reduced the service life of the samples. When performing the unitary assessment of costs and environmental impacts, the mixture with the highest concentration of RCD (30%) and CP IV cement showed the worst performance. The replacement of cement by RHA was positive only in mixtures with low CDW content (15%). Finally, the alternative which present the best environment impact versus cost integration was the one containing 15% CDW, cement CP V-ARI and no pozzolanic addition.

KEY WORDS

Construction and Demolition Waste; Costs; Environmental Impacts.



1. INTRODUÇÃO

A partir de 1987 emerge uma consciência a nível global sobre os impactos do desenvolvimento e do crescimento econômico em relação ao seu entorno. Foi nesse ano que a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento elaborou o Relatório Brundtland, que definiu o desenvolvimento sustentável como “a maneira que as gerações atuais conseguem satisfazer as suas necessidades, sem comprometer que as futuras gerações também consigam satisfazer as suas próprias necessidades”, (UNEP; SETAC, 2007).

Há mais de 30 anos, diversos segmentos da sociedade têm buscado repensar as suas estratégias de produção, inclusive o setor da construção civil, que é um dos maiores geradores de resíduos e consumidores de energia e recursos naturais. Estima-se que é necessário pelo menos 4 GJ de energia para produzir uma tonelada de Concreto Portland Ordinário (CP), e que esse processo gera a emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono na atmosfera (MEHTA, 2001). De acordo com o relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), a indústria cimenteira é responsável por, aproximadamente, 8% das emissões de gás carbônico (CO₂) antropogênico lançadas na atmosfera por ano, valor que supera a indústria de alimentos. Autores como Von Bahr et al (2002) estimam que a produção de cimento pode representar 10% de todas as emissões antropogênicas de CO₂ em um futuro próximo.

Nesse cenário, Pillai (2018) reforça que o uso de concretos duráveis feitos com materiais disponíveis no local, com baixa demanda de energia e menor emissão de CO₂ teriam significativos benefícios para melhorar a sustentabilidade na construção. A utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como uma parcela do agregado, somado à substituição parcial de cimento por pozolana proveniente da cinza da casca do arroz, pode ser uma das possíveis alternativas para minimizar esses impactos.

No Brasil, a Resolução Conama nº 307 de 2002, define os RCD como aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições, resultantes da preparação e da escavação de terrenos (CONAMA, 2002). Contêm frequentemente materiais volumosos e pesados tais como: concreto, madeira, gesso, metais, tijolos, vidros, plásticos e componentes de construção recuperados. Esse tipo de resíduo representa grande parte dos resíduos sólidos gerados. Estima-se que no Brasil, mais de 65% dos resíduos sólidos urbanos municipais sejam provenientes da construção civil, (SCHAMNE; NAGALLI, 2016).

Já a Cinza da Casca de Arroz (CCA) é um coproduto agrícola derivado da combustão, comumente denominada como queima, da casca do arroz, normalmente realizada para geração de calor ou energia. O processo de queima pode ser realizado de diferentes maneiras e com

diferentes graus de controle. De qualquer forma, Singh (2018) explica que neste processo, a maioria dos componentes evaporáveis da casca de arroz são lentamente perdidos durante a queima, permanecendo os resíduos primários como os silicatos, a maioria dos quais está na forma amorfa.

De acordo com a Tabela 01, nota-se que todos os autores relataram a cinza da casca de arroz como um material rico em sílica, contendo em média 90% de SiO₂. A quantidade de sílica é fundamental para um bom desempenho na substituição do cimento. A reação do SiO₂ presente nas cinzas da casca de arroz com o hidróxido de cálcio formado durante a reação do cimento é o princípio das reações pozolânicas, sendo o principal responsável pelas formas mais hidratadas que permitem a substituição do cimento pelo material pozolânico (MARTIRENA; MANZÓ, 2018). Devido à alta composição do concentrado de sílica, a cinza de casca de arroz pode ser utilizada com sucesso como Material Cimentício Suplementar (SCM), e atuar como um substituto parcial do cimento na indústria de concreto.

Referência	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Perda ao fogo
Chopra et al (2015)	94.00%	1.20%	0.37%	2.93%	0.60%	0.50%	-	-
Rego et al (2015)	87.08%	0.01%	0.11%	0.70%	0.42%	1.40%	0.18%	8.03%
Gastaldini et al (2014)	93.54%	0.52%	0.20%	0.79%	0.49%	1.65%	0.12%	3.39%
Thanh Le et al (2014)	86.81%	0.50%	0.87%	1.04%	0.85%	3.16%	0.69%	4.60%
Suam-Iam, Makul (2013)	93.44%	0.21%	0.18%	0.76%	0.43%	1.98%	0.05%	1.27%
Zerbino et al (2011)	95.04%	0.30%	0.44%	1.25%	0.45%	1.40%	0.09%	0.51%
Chao-Lung et al (2011)	91.00%	0.35%	0.41%	-	0.81%	3.21%	0.08%	8.50%
Chatveera (2011)	78.12%	0.31%	0.23%	0.08%	0.34%	0.82%	0.17%	8.31%
Ganesan et al (2008)	87.32%	0.22%	0.28%	0.48%	0.28%	3.14%	1.02%	2.10%
Della et al (2002)	94.95%	0.39%	0.26%	0.54%	0.90%	0.94%	0.25%	0.85%
Média:	90.13%	0.40%	0.34%	0.95%	0.56%	1.82%	0.29%	4.17%

Tabela 01: Composição química da Cinza de Casca de Arroz (CCA).

Fonte: Autores.

Para analisar o impacto ambiental e a viabilidade econômica dessas substituições é fundamental adotar métodos consolidados de avaliação. O Conselho Brasileiro da Construção Sustentável propõe uma plataforma global simplificada de Avaliação do Ciclo de Vida modular (ACV-m), em que se procura focar nos aspectos ambientais mais relevantes, como consumo de água, matérias-primas, energia, geração de resíduos e emissões de CO₂ (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2014). Já o Custo do Ciclo de Vida (CCV) é uma ferramenta que permite analisar os custos totais do sistema em análise, desde a sua produção até o fim da sua vida útil, através descrição minuciosa de cada etapa, com a consideração dos custos envolvidos, relacionando com bancos de dados com valores atualizados. A análise do CCV em conjunto com a ACV-m permite relacionar tanto aspectos econômicos como ambientais e podem atuar como indicadores que facilitem e complementem uma futura tomada de decisão.

Este trabalho visa analisar misturas de concreto com agregado graúdo residual de construção e demolição e adição mineral pozolânica proveniente da cinza da casca

do arroz, através dos ensaios de resistência à compressão axial e durabilidade, a fim de fundamentar o estudo da avaliação do custo e do ciclo de vida de diferentes amostras feitas com a utilização de dois tipos de cimento e um tipo de pozolana, dimensionados para um nível de resistência fixo. Dessa forma, será possível definir qual é a opção de mistura e o teor ideal de substituintes que melhor integra custo, impacto ambiental, tempo de vida e propriedades estruturais do concreto.

2. METODOLOGIA

2.1 Composição

Foram desenvolvidas diferentes misturas de concreto com a mesma resistência característica à compressão (fck) de 30 MPa, compostas por dois tipos de cimento Portland (CP IV e CP V-ARI), agregado miúdo (areia natural), agregado graúdo com substituição de teores distintos de resíduos de construção e demolição (RCD), pozolana (cinza da casca de arroz) e aditivo superplastificante. Os resíduos de construção e demolição foram pré-selecionados, de modo que continham uma porcentagem de, aproximadamente, 93% de concreto, argamassa e cerâmica, peneirados ao diâmetro máximo de 19mm e empregados no concreto com superfície saturada seca, devido a sua alta capacidade de absorção. A cinza da casca de arroz era proveniente da região de Santa Maria – RS. Seu processo de combustão sem controle de temperatura e tempo de exposição à altas temperaturas (queima a céu aberto). Para garantir a uniformidade do material, a amostra utilizada foi obtida de diferentes lotes e homogeneizada antes da moagem. A cinza foi submetida a moagem em moinho de bolas por 1 hora.

Os diferentes teores, em massa, de RCD e pozolana adicionados em cada mistura estão representados na Tabela 02 e a quantidade de material por m³ de concreto está descrito na Tabela 03. A composição do cimento foi baseada na apostila técnica de cimento (ITAMBÉ, 2010), em que os teores de clínquer nos cimentos CP IV e CP V-ARI eram de 63,14% e 92,72% da massa, respectivamente. As proporções dos materiais de cada mistura foram definidas em um estudo de dosagem prévio (SANTOS, 2017).

Traço	Composição
TR IV	Referência, CP IV
15 RCD IV	15% de RCD + CP IV
30 RCD IV	30 % de RCD + CP IV
TR V	Referência, CP V
15 RCD V	15% de RCD + CP V
30 RCD V	30 % de RCD + CP V
15RCD25CCA V	15% de RCD + 25% de CCA + CPV
30RCD25CCAV	30 % de RCD + 25% de CCA + CPV

Tabela 02: Denominação e composição dos traços.
 Fonte: Autores.

Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	RCD (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)	Clínquer no aglomerante (kg)
TR IV	356,59	-	706,05	1026,64	-	174,73	-	225,15
15 RCD IV	381,71	-	664,18	889,39	156,50	171,77	0,38	241,01
30 RCD IV	483,46	-	546,31	720,36	309,42	169,21	0,48	305,26
TR V	276,91	-	800,27	1077,18	-	177,22	-	256,75
15 RCD V	440,29	-	629,61	911,40	158,50	176,12	0,57	408,24
30 RCD V	581,48	-	476,82	744,30	319,82	174,45	0,69	539,15
15RCD25CCA V	255,84	63,96	775,20	900,57	158,62	173,97	0,25	237,21
30RCD25CCA V	286,40	71,60	727,47	730,33	312,18	171,84	0,40	265,55

Tabela 03: Quantidade de materiais por m³ de concreto.
 Fonte: Autores

2.2 Testes de resistência e durabilidade

Os concretos foram testados quanto à resistência à compressão axial e de carbonatação acelerada a fim de embasar a avaliação do ciclo de vida e do custo-benefício em relação à durabilidade apresentada. O ensaio de compressão foi determinado através da norma NBR 5739 (ABNT, 2007), em que foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm para cada um dos traços e idades testadas. As amostras foram curadas em câmara úmida, retificadas e ensaiadas em uma prensa hidráulica aos 28 e aos 91 dias.

Para avaliar a durabilidade, mediu-se as profundidades e os coeficientes de carbonatação de cada mistura. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10x20cm, cortados ao meio e impermeabilizados no perímetro e em uma das bases por meio de pintura com três demãos de verniz poliuretânico, possibilitando assim que o fluxo de CO₂ penetrasse apenas de forma axial pela face superior. As operações de pré-condicionamento seguiram as recomendações da RILEM TC – 116 PCD (RILEM, 1999). Aos 91 dias de idade, os corpos de prova foram condicionados em câmara climatizada digital sob condições de 3% de CO₂, 75% de umidade relativa e temperatura de 23°C. Após os períodos de 4, 8, 12 e 16 semanas, as profundidades carbonatadas foram medidas através da aspersão das amostras em solução de fenolftaleína, seguido pelo registro fotográfico e análise das imagens por ferramentas digitais. A profundidade de carbonatação de cada amostra foi definida como a média de 100 medidas realizadas no corpo de prova. As leituras foram realizadas em quatro idades distintas, após 4, 8, 12 e 16 semanas de permanência na câmara de carbonatação, e então calculadas as médias finais.

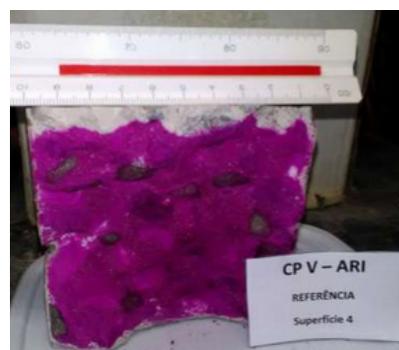


Figura 01: Aspersão de fenolftaleína nas amostras;
 Fonte: Autores.

2.3 Ciclo de vida

Com o objetivo de avaliar a sustentabilidade no aspecto econômico e ambiental das diferentes misturas de concreto com substituição de agregado por RCD e adição pozolânica, foram feitas as seguintes considerações iniciais: a unidade em estudo foi um pilar de concreto armado, de seção 25x50 cm e altura 2,75 m, posicionado no térreo de um edifício, abrigado de intempéries, em uma estrutura coberta e exposta ao ar, sendo o fenômeno de carbonatação o único fator deteriorante considerado. O ambiente predominante é de classe de agressividade ambiental II e o cobrimento das armaduras seria de 25 mm. O volume total de concreto correspondeu a 0,344 m³ e a massa de aço do pilar fictício equivalia a 21,40 kg (taxa de aço de 0,63%), o qual foi dimensionado para atender esforço normal (Nd) de 1200 kN, momento fletor vertical (Myd) de 55 kN.m e momento fletor horizontal (Mxd) de 78 kN.m. O fck foi fixado em 30 MPa, com vida útil mínima de 50 anos e máxima de 150 anos.

Os diferentes tipos de pilares que não atingiram a vida útil mínima fixada através do ensaio de carbonatação receberam uma pintura superficial com tinta acrílica, a fim de prolongar a sua durabilidade. Conforme o fabricante, a pintura poderia elevar a vida útil da estrutura de 2 e 10 anos, e a bibliografia relaciona o uso de cobertura superficial com a redução da profundidade de carbonatação em torno de 2 a 3 vezes. Logo, baseado nas condições em que o pilar estaria exposto, estimou-se um acréscimo de 8 anos de vida útil e uma redução de 2,5 no coeficiente de carbonatação dos pilares pintados, (KAZMIERCZAK e HELENE, 1995).

Para as unidades funcionais que não receberam pintura, considerou-se necessária a lavagem a cada 3 anos, a fim de manter a estética e a vida útil da estrutura. O custo da lavagem, do consumo de energia elétrica, da tinta e de seus serviços de pintura foram calculados com auxílio dos quantitativos da Tabela de Composições e Preços para Orçamentos (TCPO, 2008) e do inventário de dados do Software SimaPro 8.4, com preços dos insumos atualizados.

Para as fases de obtenção de matéria prima, como agregado graúdo e miúdo, cimento CP-IV e CP-V, foram consultadas diretamente as fábricas fornecedoras desses materiais. Os dados sobre água, madeira, aditivo empregado, cinza da casca de arroz e reciclagem dos resíduos de construção e demolição foram retirados do banco de dados do Software SimaPro 8.4. Já as informações relacionadas ao aço foram baseadas no Relatório de Sustentabilidade do Aço (2012), do Instituto Aço Brasil (2013).

Para a execução do pilar foram considerados os dados do inventário formulado por Silva (2014) e para as fases de manutenção, demolição e reciclagem da unidade funcional foram utilizados dados coletados por Lamberti (2015). Por fim, a quantificação de CO₂ fixada em cada pilar foi

realizada através do método mais utilizado pela bibliografia atual (LAGERBLAD, 2006; PADE e GUIMARÃES, 2007; COLLINS, 2010), representado pela Equação (1).

$$CO_2 = x.c.CaO.R.A.M \quad (1)$$

Onde x é a profundidade carbonatada em metros, com valor adotado de 0,025 m (Classe de agressividade ambiental II, definida anteriormente), devido ao cobrimento da armadura; c é a quantidade (kg/m³) de clínquer no aglomerante, descrito na tabela 02; CaO é a proporção de óxido de cálcio, adotado 0,65 (Collins, 2010), onde o valor 1 seria 100%; R é a proporção de CaO totalmente carbonatada e transformada em CaCO₃, assumido 0,75 (LAGERBLAD, 2006); A é área de concreto exposta (m²); M é a fração molar química adimensional de CO₂/CaO = 0,79 (Collins, 2010).

2.4 Custos e impactos ambientais

A Avaliação do Custo de Vida modular (ACV-m), proposta pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014), permite analisar todo o processo construtivo, da aquisição a disposição final dos produtos, e indicar quais são as fases responsáveis pelos maiores impactos. A ACV-m é uma avaliação prática, focada nos aspectos ambientais mais relevantes, que são: consumo de energia, consumo de água, consumo de matérias-primas, geração de resíduos e emissão de CO₂ e demais gases que contribuem para o efeito estufa.

Existem diferentes modelos para avaliar esses impactos ambientais. O presente estudo adotou os princípios da NBR 14040/2014 com auxílio do Software SimaPro 8.4. O método de avaliação escolhido foi o Eco-indicator 99, o qual utiliza como resultado final da quantificação a unidade Pt, que equivale a um milésimo da carga ambiental média anual que um cidadão europeu produz. O uso do cidadão europeu como referência pode fugir da realidade brasileira, mas as ferramentas disponíveis ainda não refletem a realidade nacional. A interpretação dos dados resultantes se deu através de um comparativo unitário, baseado na divisão dos dados de impacto ambiental pela resistência à compressão aos 28 dias (fc28) e pela vida útil, em anos, que cada mistura de concreto apresentou.

Com o intuito de aproximar a análise da realidade brasileira, foram utilizadas referências nacionais para realizar os cálculos de custo de vida. Utilizou-se a TCPO (2008), com preços atualizados e percentual de encargos sociais de 117,66 %, de acordo com o Sistema Nacional de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), com base de referência 03/2017. A tabela TCPO (2008) foi adotada por apresentar maior grau de detalhamento dos insumos e serviços para cada composição.

A fim de complementar a análise, foi realizada a integração dos resultados com o objetivo de escolher a melhor alternativa ambiental/econômica das misturas de concreto, através da média geométrica dos índices ambientais e econômicos. Para tanto, a comparação dos

resultados deu-se através dos índices de custo (Ic) e impacto unitário (Ia), em que se adotou o pilar REF CPV-ARI como referência, já que os demais trabalhos do grupo de estudos, Silva (2014) e Lamberti (2015) tomaram como referência o pilar com CPV e maior resistência. Os resultados dos demais pilares foram relacionados com o de referência e o resultado dessa relação é o índice apresentado.

3. RESULTADOS

3.1 Compressão e Carbonatação

A Tabela 04 apresenta a profundidade média de carbonatação e os valores de resistência encontrados.

MISTURA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			PROFUNDIDADE (mm)			
	f _{c28}	f _{c91}	água/materiais cimentícios	SEMANAS			
				4	8	12	16
TR IV	30,2	37,3	0,49	11,8 2	13,13	15,50	18,28
15 RCD IV	30,0	35,4	0,45	10,4 9	13,77	16,10	20,28
30 RCD IV	30,1	32,9	0,35	7,91	9,35	16,40	20,63
TR V	30,5	39,1	0,64	8,93	12,65	14,40	18,05
15 RCD V	30,4	36,5	0,40	0	0	0	0
30 RCD V	30,1	33,7	0,30	0	0	0	0
15RCD25CCA V	33,0	38,7	0,64	9,58	10,85	14,70	16,65
30RCD25CCA V	32,1	35,9	0,60	7,93	10,10	10,70	13,69

Tabela 04: Resistência à Compressão e Profundidade média de Carbonatação.

Fonte: Autores.

Observa-se que para os concretos curados por 28 dias, os resultados de resistência à compressão foram semelhantes, pois os concretos foram dosados para atingir uma única resistência. Ao aumentar o tempo de cura para 91 dias, conseqüentemente, aumentou-se a resistência à compressão. Contudo, dessa vez o maior valor atingido foi da mistura referência de CP V. Percebe-se que nenhuma mistura com substituição de agregado natural por RCD atingiu valor de resistência superior ao seu traço de referência aos 91 dias, e quanto maior a porcentagem de substituição de agregado residual, mais acentuada foi a queda na resistência. A presença da CCA como substituição do cimento, em conjunto com os agregados residuais, apresentou um aumento da resistência em todos os casos, mas seguiu o mesmo padrão de queda observado pela porcentagem de RCD. Observa-se também que todos os traços com cimento CP V obtiveram maiores resultados de resistência que os seus respectivos traços com cimento CP IV. A análise em igualdade de resistência aos 28 dias, situação comum de projeto, permite quantificar a durabilidade dos diferentes conjuntos de aglomerantes testados.

Em relação à profundidade de carbonatação, observa-se que as maiores profundidades foram atingidas pelas misturas compostas pelo cimento CP IV. Já para as amostras com cimento CP V e substituição de agregado natural por RCD, a baixa relação água/material cimentício (a/mc) afetou a profundidade de carbonatação, o que resultou em ausência desse fenômeno. Quando houve adição de pozolana, as amostras apresentaram profundidade

carbonatada semelhante ao traço referência, com valores inferiores nas semanas finais.

3.2 Vida útil

Através das médias das profundidades de carbonatação, foi possível traçar retas de tendência em que a inclinação é o coeficiente de carbonatação (Kc), utilizado para calcular o tempo teórico de vida útil de cada opção de pilar estudando. Adotou-se um avanço de frente de carbonatação de 20 mm, estimado subtraindo dos 25 mm de cobrimento reduzido dos primeiros 5 mm superficiais que possuem pH entre 11 e 8,5. O tempo de vida útil provável foi calculado levando em consideração a pintura nos pilares com vida útil teórica inferior a 50 anos, de acordo com a Norma NBR 15575/2013.

Percebe-se que os menores resultados de vida útil teórica foram das amostras que continham CP IV e substituição por RCD. Dentre as misturas com cimento CP V, foi o traço referência que apresentou menor tempo estimado (21 anos). Por fim, o maior resultado de vida útil estimado teórico foi da amostra com substituição de 30% RCD e 25% CCA, atingindo 56 anos, valor superior ao mínimo exigido.

3.3 Custos

Os cálculos de custo foram baseados na TCPO com encargos sociais referentes ao mês de Março/2017 do SINAPI. Os valores são referentes ao custo do tempo estimado provável do ciclo de vida de cada unidade funcional. Dessa forma, também foram considerados os processos de pintura (a cada 8 anos) ou de lavagem (a cada 3 anos) necessários para que o pilar atingisse a vida útil estimada. A Tabela 06 descreve os custos de cada tipo de pilar. Os tipos de concreto que tiveram custo zero indicado para a pintura ou lavagem são os que não demandaram o processo para o computo do custo.

Observa-se que os processos de manutenção (pintura e lavagem) foram significativos para a composição do custo final das unidades, em que a pintura é o processo mais oneroso, que representou até 84,7% do custo total da amostra com cimento CP IV. Já a lavagem foi responsável por 55,4% do valor total da mistura com 30% RCD+25% CCA, que apresentou o menor custo final dentre as possibilidades. Por esses motivos, os pilares que necessitaram de pintura apresentaram custos mais elevados em relação aos que necessitaram apenas de lavagem.

Na figura 02 apresenta-se o custo unitário de cada pilar, obtido pela divisão do custo total (R\$) pela resistência (MPa) aos 28 dias multiplicada pelo tempo provável de vida útil (anos). A unidade que apresentou o maior custo unitário foi a que continha 30% RCD e cimento CP IV, embora essa tenha apresentado um dos menores custos totais. Esse elevado valor unitário é decorrente do alto coeficiente de carbonatação apresentado (6,64), que resultou em um dos menores tempos de vida útil provável (56 anos), com necessidade de pintura. A mesma influência

é observada para o pilar que apresentou o menor custo unitário, com 15% RCD e cimento CP V, uma vez que sua profundidade carbonatada foi nula e o tempo de vida útil provável atingido superior a 150 anos, necessitando apenas de lavagem.

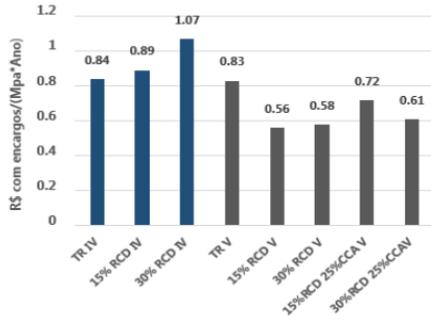


Figura 02: Custo unitário de cada pilar;
Fonte: Autores.

3.3 Impactos Ambientais

A avaliação do ciclo de vida foi feita através da análise dos impactos ambientais totais do berço ao túmulo, por meio do inventário do Software SimaPro 8.4. A Figura 03 é uma captura de tela desse software e apresenta os resultados dos impactos de cada amostra sobre a saúde humana, o ecossistema e os recursos naturais, em unidade de Pt (milésimo de carga ambiental média anual de um cidadão europeu)

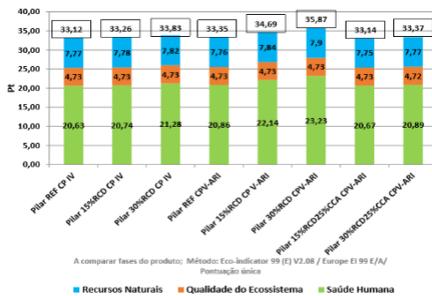


Figura 03: Impactos totais de cada pilar;
Fonte: Autores

Observa-se que todas as misturas que tiveram uma parte do agregado graúdo substituído por RCD apresentaram valores de impactos totais superiores ao seu traço de referência, tanto para amostras com cimento CP IV como cimento CP V, com ou sem adição de CCA. Essa tendência pode estar relacionada ao maior consumo de cimento que as misturas com teores de RCD exigem, gerando maior impacto total. Contudo, ressalta-se que a média geral entre os oito traços foi de 33,83 Pt e o desvio padrão de 0,975, o que confere um coeficiente de variação de apenas 2,9%. Logo, as diferenças entre os valores são muito pequenas para chegar a conclusão sobre qual traço teria menos impacto total. Além disso, deve-se considerar a disponibilidade local de recursos a fim de tomar a melhor decisão.

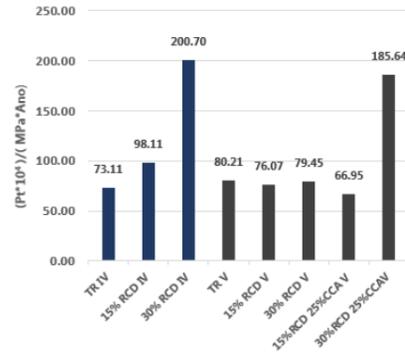


Figura 04: Impactos unitários de cada pilar;
Fonte: Autores.

Traço	Kc	Tempo Estimado Teórico (anos) $t = (x/Kc)^2$	Kc com pintura (Kc/2,5)	Tempo Estimado Provável (anos)
TR IV	3,20	39	1,28	150
15 RCD IV	4,72	17	1,88	113
30 RCD IV	6,64	9	2,65	56
TR V	4,35	21	1,74	132
15 RCD V	0	150*	**	150
30 RCD V	0	150*	**	150
15RCD25C CA V	3,66	29	1,46	150
30RCD25C CAV	2,65	56	**	56

* Vida útil máxima considerada **Somente Lavagem

Tabela 05: Vida útil de cada um dos pilares.
Fonte: Autores.

Etapas	Custo de ciclo de vida, incluindo encargos sociais (R\$/Pilar)							
	TR IV	15% RCD IV	30% RCD IV	TR V	15% RCD V	30% RCD V	15%RCD+25CCA V	30%RCD+25CCA V
CONSTRUÇÃO	519,39	524,04	542,25	514,67	552,00	582,74	461,83	521,68
PINTURA	3240,70	2441,33	1209,86	2851,82	0,00	0,00	3240,70	0,00
LAVAGEM	0,00	0,00	0,00	0,00	1959,38	1959,38	0,00	731,50
DESCONSTRUÇÃO	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69
TRANSPORTE DE ESCOMBROS	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16
MANEJO DO FUTURO RCD	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
TOTAL	3826,1	3031,4	1818,1	3432,5	2577,4	2608,1	3768,5	1319,2

Tabela 06: Composição dos custos do ciclo de vida estimados para cada unidade.
Fonte: Autores.

Traço	Emissão de CO ₂ (kg/pilar)	Absorção de CO ₂ (kg/pilar)	CO ₂ eq (kg/pilar)
TR IV	471,39	8,94	462,45
15 RCD IV	474,11	9,57	464,54
30 RCD IV	485,02	12,12	472,90
TR V	476,69	10,20	466,49
15 RCD V	502,5	16,21	486,29
30 RCD V	524,77	21,41	503,36
15RCD25C CA V	473,43	9,42	464,01
30RCD25C CAV	478,25	10,55	467,70

Tabela 07: Gás Carbônico Equivalente (CO₂eq)
Fonte: Autores.

Traço	Custo Unitário (R\$*MPa*ano ⁻¹)	Índice do Custo Unitário (t)	Impacto Unitário (Pt*10 ⁴ *MPa*ano ⁻¹)	Índice do Impacto Unitário (t)	Média Geométrica √(t*Pt)
TR IV	0,84	1,01	73,11	0,91	0,96
15 RCD IV	0,89	1,07	98,11	1,22	1,14
30 RCD IV	1,07	1,29	200,70	2,50	1,80
TR V	0,83	1,00	80,21	1,00	1,00
15 RCD V	0,56	0,67	76,07	0,95	0,80
30 RCD V	0,58	0,70	79,45	0,99	0,83
15RCD25C CA V	0,72	0,87	66,95	0,83	0,85
30RCD25C CAV	0,61	0,73	185,64	2,31	1,30

Tabela 08: Média geométrica dos índices de custo e impactos unitários.
Fonte: Autores.

Assim como feito no estudo de custo, a fim de realizar uma análise mais detalhada e realista, elaborou-se a figura 04, que representa os impactos unitários de cada pilar através da divisão dos impactos totais (Pt) pela resistência (Mpa) aos 28 dias e pelo tempo provável de vida útil (anos). O valor final foi multiplicado por 104 para facilitar a compreensão.

Ressalta-se a relação inversa de tempo de vida útil com o impacto unitário de cada pilar, uma vez que novamente a unidade que continha 30% RCD e cimento CP IV apresentou o maior impacto unitário, seguido pela amostra com 30% RCD, 25% CCA e cimento CP V-ARI. Ambas apresentaram a menor vida útil entre todas as amostras (56 anos). Já a terceira menor vida útil (113 anos) é pertencente à amostra com 15% RCD e cimento CP IV, mistura que também resultou no terceiro maior impacto unitário.

Além dos impactos totais e unitários, também foram realizados os cálculos de gás carbônico equivalente (CO₂eq), em que as substâncias obtidas pelo Software SimaPro 8.4 foram multiplicadas pelos fatores de relevância da tabela 2.14 da Fourth Assessment Report (IPCC 2007) a fim de mensurar a quantidade liberada de CO₂ para produção de cada pilar. A quantidade absorvida de CO₂ durante a sua vida útil foi calculada pela Equação 1 apresentada na metodologia. Dessa forma foi possível estimar a pegada de carbono de cada amostra, descrita na tabela 07.

Os pilares que foram produzidos com cimento CP V obtiveram maior valor de gás carbônico equivalente. Além disso, observa-se que quanto maior o teor de substituição de RCD, também maior é a emissão de CO₂. Isso é devido ao maior consumo de cimento na produção do concreto, uma vez que a relação água/material cimentício das amostras com RCD é diminuída a fim de compensar a queda de resistência ocasionada pela substituição do agregado graúdo pelo material de demolição. Dessa forma, as duas misturas que apresentaram maior CO₂eq (503,36 kg e 486,29 kg) também são as que apresentaram menor relação água/material cimentício (0,30 e 0,40).

3.4 Análise global: Custos versus Impactos

Com o intuito de estabelecer uma análise mais completa e abrangente dos resultados, elaborou-se a Tabela 08, em que o custo unitário e o impacto unitário de cada pilar foram apresentados em forma de índice, a partir do pilar referência CPV-ARI, que foi escolhido como padrão (I_c =1,00 e I_a=1,00). Para determinar a melhor opção de mistura estudada, foi calculada a média geométrica (MG) entre os índices de custo (I_c) e impacto unitário (I_a), a fim de integrar a análise final em relação a sustentabilidade e ao custo. Quanto menor a média geométrica atingida, melhor é o resultado final.

Observa-se que os pilares com cimento CP IV não apresentaram ganhos na relação sustentabilidade x custo, obtendo-se um aumento da média geométrica (MG) com a

substituição do agregado graúdo por RCD. Essa tendência é devido ao alto índice de impacto unitário consequente do tempo de vida útil abaixo da média encontrada nas oito amostras. Já para os pilares com cimento CP V, com exceção da mistura com 30% de RCD + 25% de CCA, houve diminuição da média geométrica dos traços com a presença de resíduos de construção e demolição, e consequente ganhos na relação sustentabilidade x custo. O melhor resultado foi do pilar com 15% de RCD que apresentou MG de 0,80, seguida pelos pilares com 30% de RCD e com 15% de RCD +25% de CCA que apresentaram MG de 0,83 e 0,85, respectivamente. Esses resultados são influenciados pelo baixo índice de custo unitário que as amostras com cimento CP V apresentaram, sendo opções mais econômicas que as amostras com cimento CP IV. No entanto, a mistura do cimento CP V com 30% de RCD +25% de CCA foi a única que se apresentou desfavorável, com média geométrica 30% acima da referência devido a sua breve vida útil estimada que elevou o valor de impacto unitário.

4. CONCLUSÕES

Logo, é possível concluir que quando é utilizado resíduo de construção e demolição como substituinte parcial do agregado natural para produção de concreto com cimento CP V, há ganhos na relação impacto ambiental versus custo. No entanto, a presença de RCD no concreto com cimento CP IV não é benéfica. Quando o cimento é substituído parcialmente pela cinza da casca de arroz, é possível obter ganhos na relação impacto ambiental versus custo em alguns casos, contanto que estejam presentes baixos teores de RCD na mistura (até 15%), visto que teores iguais a 30% já apresentam resultados negativos. Por fim, destaca-se que dentre os oito traços estudados, a opção que melhor integra custo, impacto ambiental, vida útil e resistência à compressão seria a mistura de concreto feita com cimento CP V, que contenha substituição de 15% de resíduos de construção e demolição em relação a massa de agregado natural.

Ressalta-se que os impactos totais e o tempo estimado de vida útil das misturas foram afetados significativamente pelos diferentes consumos de cimento de cada amostra, uma vez que foi fixado o valor de resistência característica à compressão única de 30 MPa. Sugere-se que futuros trabalhos realizem a análise com unidades de estudo dimensionadas para diferentes resistências características, as quais não estejam tão suscetíveis a variações na relação água/material cimentício entre as misturas.

REFERÊNCIAS

UNEP; SETAC. United Nations Environmental Programme-Society Of Environmental Toxicology And Chemistry. **Life cycle management: a business guide to sustainability**. Paris, 51 p, 2007.

MEHTA, P.K. **Reducing the Environmental Impact of Concrete**, ACI Concrete International, 23 (10), pp. 61-66, 2001.

IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. **Climate change 2014: Mitigation of Climate Change**. IPCC, 2014. Disponível em:<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf>. Acesso em 03 de junho de 2021.

VON BAHR, B et al. **Experiences of environmental performance evaluation in the cement industry. Data quality of environmental performance indicators as a limiting factor for Benchmarking and Rating**. Journal of Cleaner Production. Pp 723-725, 2002.

PILLAI, R.G et al. **Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3)**. Cement and Concrete Research, 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil**. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial, 2002.

SCHAMNE, Annelise N.; NAGALLI, André. **Reverse logistics in the construction sector: a literature review**, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v.21, pp. 691-702, 2016.

SINGH. B. **Rice Husk – An Overview**. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete. Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, India, 2018.

MARTIRENA. F; MANZÓ. J. **Vegetable ashes as Supplementary Cementitious Materials**. Cement and Concrete Research, Vol 114, pp 57-64, 2018.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Projeto ACV-m: Sustentabilidade na indústria de blocos e pavimentos de concreto: Avaliação de Ciclo de Vida Modular**. p 94, 2014.

ITAMBÉ. **Cimento**. Curitiba, Itambé, 20 p, 2010.

SANTOS, Cristiane Carine. **Concreto com Misturas de Agregado Residual de Construção e Demolição (RCD) e Pozolana, com Ênfase na Carbonatação**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

NBR 5739. **Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

RILEM. **Recommendations of TC 116-PCD. Tests for gas permeability of concrete**. Materials and Structures. V. 32, 1999.

KAZMIERCZAK, Cláudio de Souza.; HELENE, Paulo. **Determinação da eficiência de películas usadas como proteção contra carbonatação**. Boletim Técnico – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

TCPO. **Tabela de Composição de Preços para**

Orçamento. 13 edição. São Paulo, Pini, 2008.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Instituto Aço Brasil, 49 p, 2013.

LAMBERTI, L. A. **Análise do ciclo de vida e de custo de pilar com diferentes traços de concreto frente a carbonatação: do berço ao túmulo**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015

LAGERBLAD, B. **Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle – State of the art**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI, 2006.

PADE, C ; GUIMARÃES, M. **The CO2 uptake concrete in a 100 years perspective**. Cement and Concrete Research. V 37, n 9, p 1348- 1356, 2007.

COLLINS, F. **Inclusion of carbonation during life cycle of built and recycled concrete; influence on their carbon footprint**. The International Journal of Life Cycle Assessment. V 15, n6, 2010.

NBR ISO 14040. **Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2014.

BRASIL. **Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil**, 2015. Disponível em:< www.caixa.gov.br/sinapi>. Acesso em: 03 junho de 2021.

NBR 15575-1: **Edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais**. Rio de Janeiro; ABNT, 2013.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro 7 Database Manual: Methods: Library**. 67 p, 2016.

IPCC: Intergovernmental Panel On **Climate Change**. **Climate change 2007: Mitigation of Climate Change**. IPCC, 2007. Disponível em:< http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg3_report_mitigation_of_climate_change.htm>. Acesso em: 03 de Junho de 2021.

AUTORES

ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7031-3000>.

GUILHERME DANEZI PICCINI, Eng. civil | Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Curso de engenharia civil. Santa Maria, RS. Brasil. Av Roraima, nº 1000. Cidade Universitária. Bairro Camobi. Santa Maria, RS. CEP: 97105-900 | email: guilhermpiccini98@gmail.com

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0988-2682>.

CRISTIANE CARINE DOS SANTOS, Dra. | Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental. Santa Maria, RS. Brasil. Av Roraima, nº 1000. Cidade Universitária. Bairro Camobi. Santa Maria, RS. CEP: 97105-900 | email: cristianecdosantos@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5772-9933>.

ANDRÉ LÜBECK, Dr. | Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Santa Maria, RS. Brasil. Av Roraima, nº 1000. Cidade Universitária. Bairro Camobi. Santa Maria, RS. CEP: 97105-900 | email: andre.lubeck@ufsm.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0653-1227>.

GERALDO CEHELLA ISAIA, Dr. | Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Santa Maria, RS. Brasil. Av Roraima, nº 1000. Cidade Universitária. Bairro Camobi. Santa Maria, RS. CEP: 97105-900 | email: geraldoisaia@gmail.com

COMO CITAR ESTE ARTIGO

ISAIA, Geraldo Cechella; LÜBECK, André; DOS SANTOS, Cristiane Carine; PICCINI, Guilherme Danezi. Análise do Custo do Ciclo de Vida de Concretos Ecoamigáveis com Agregado Residual de Demolição e Pozolana. *MIX Sustentável*, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 62-70, dez. 2022. ISSN 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: __/__/__. doi:<https://doi.org/10.29183/2447-3073>. MIX2022.v9.n1.62-70.

SUBMETIDO EM: 19/06/2021

ACEITO EM: 21/09/2022

PUBLICADO EM: 20/12/2022

EDITORES RESPONSÁVEIS: Flávio Gabriel da Silva Craveiro, Lisiane Ilha Librelotto.

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

GDP: Curadoria de dados; Investigação; Visualização; Escrita - rascunho original; Escrita - revisão e edição.

CCS: Conceituação; Curadoria de dados; Análise formal; Aquisição de financiamento; Investigação; Metodologia; Validação; Visualização; Escrita - rascunho original; Escrita - revisão e edição.

AL: Análise formal; Administração de projetos; Supervisão; Escrita - revisão e edição.

GCI: Conceituação; Aquisição de financiamento; Metodologia; Administração de projetos; Supervisão.

Declaração de conflito: nada foi declarado.