

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Danezi Piccini

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

Santa Maria, RS  
2021

**Guilherme Danezi Piccini**

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. André Lübeck

Santa Maria, RS  
2021

---

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a Guilherme Danezi Piccini.

A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. Endereço: Avenida Fernando Ferrari, 1684, Bairro Nossa Senhora de Lourdes, Santa Maria, RS.

CEP: 97050-800 Fone: +55 55 99979 3566; E-mail: [guilhermpiccini98@gmail.com](mailto:guilhermpiccini98@gmail.com)

---

**Guilherme Danezi Piccini**

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

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal de  
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito  
parcial para obtenção do título de  
**Engenheiro Civil.**

**Aprovado em:**

---

**André Lübeck, Prof. Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Cristiane Carine dos Santos, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. (UFSM)**

---

**Ana Paula Maran, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. (UFSM/Cachoeira do Sul)**

Santa Maria, RS  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo, agradeço à minha família, que além de me proporcionar todo o suporte para chegar até aqui, sempre foi a minha melhor referência. Meu pai Juarez, maior exemplo de carisma e de inteligência. Minha mãe Adriana, exemplo perfeito de amor e de doação. E minha irmã Júlia, meu espelho de amizade e de excelência.

Agradeço aos diversos educadores que contribuíram para a minha evolução durante essa jornada. Especialmente ao Professor André Lübeck, que me orientou durante esse trabalho e ao Professor Mahmoud Shakouri, que me incentivou na área de pesquisa e proporcionou a oportunidade de trabalhar e aprender no Laboratório de Concreto da Universidade de Nebraska – Kearney.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas que se fizeram presente ao longo destes anos, e que através dos diversos momentos compartilhados, contribuíram para tornar essa experiência incrível. Tanto acadêmica, quanto pessoal.

*“Life is not primarily a quest for pleasure, as Freud believed, or a quest for power, as Alfred taught, but a quest for meaning. The greatest task for any person is to find meaning in his or her life.”*

*“...every human being has the freedom to change at any instant.”*

*(Viktor Emil Frankl, Man's Search for Meaning, 1946)*

## RESUMO

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

AUTOR: Guilherme Danezi Piccini

ORIENTADOR: André Lübeck

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, este trabalho objetiva estudar a sustentabilidade e o custo de diferentes alternativas de concreto ecoamigáveis, 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, permitiu 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 sustentabilidade x 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. Sustentabilidade. Avaliação do Ciclo de Vida

## ABSTRACT

### LIFE CYCLE COST ANALYSIS OF ECOFRIENDLY CONCRETE WITH RESIDUAL CONSTRUCTION AND DEMOLITION AGREGATE AND POZZOLAN

AUTHOR: Guilherme Danezi Piccini  
ADVISOR: André Lübeck

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 sustainability 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 sustainability x cost integration was the one containing 15% CDW, cement CP V-ARI and no pozzolanic addition.

**Keywords:** Construction and Demolition Waste. Costs. Environmental Impacts. Sustainability. Life Cycle Assessment



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Aspersão de fenoftaleína nas amostras .....	25
Figura 2.2 – Custo unitário de cada pilar .....	33
Figura 2.3 – Impactos totais de cada pilar.....	34
Figura 2.4 – Impactos unitários de cada pilar.....	35

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1.1 – Taxas de desperdício de materiais de construção no Brasil .....	14
Tabela 2.1 – Composição química da Cinza da Casca de Arroz (CCA) .....	20
Tabela 2.2 – Denominação e composição dos traços.....	23
Tabela 2.3 – Quantidade de materiais por m <sup>3</sup> de concreto .....	24
Tabela 2.4 – Resistência a compressão e profundidade média de carbonatação. ...	29
Tabela 2.5 – Vida útil de cada um dos pilares.....	31
Tabela 2.6 – Composição dos Custos do Ciclo de Vida (CCV) estimado para cada unidade .....	32
Tabela 2.7 – Gás carbônico equivalente (CO <sub>2</sub> eq).....	36
Tabela 2.8 – Média geométrica dos índices de custo e impacto unitário .....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACV-m	Avaliação do Ciclo de Vida Modular
CCA	Cinza da Casca de Arroz
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono; Gás Carbônico
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
I <sub>c</sub>	Índice do Custo Unitário
I <sub>a</sub>	Índice do Impacto Unitário
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SCM	<i>Supplementary Cementitious Material</i>
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício; Sílica
TCPO	Tabela de Composição de Preços para Orçamentos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	17
1.2.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
1.2.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>17</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>ARTIGO SUBMETIDO</b> .....	<b>19</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	19
2.2	METODOLOGIA.....	23
2.2.1	<b>Composição</b> .....	<b>23</b>
2.2.2	<b>Teste de resistência e durabilidade</b> .....	<b>24</b>
2.2.3	<b>Ciclo de vida</b> .....	<b>26</b>
2.2.4	<b>Custos e Impactos Ambientais</b> .....	<b>28</b>
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	29
2.3.1	<b>Compressão e Carbonatação</b> .....	<b>29</b>
2.3.2	<b>Vida útil</b> .....	<b>30</b>
2.3.3	<b>Custos</b> .....	<b>32</b>
2.3.4	<b>Impactos Ambientais</b> .....	<b>33</b>
2.3.5	<b>Análise Global: Custos x Impactos</b> .....	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>40</b>
3.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	42
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem crescido exponencialmente. No início da década passada, 84,36% da população brasileira vivia em aglomerados urbanos (IBGE, 2011). De 2003 a 2012 houve um crescimento de 52,10% do setor imobiliário, equivalente à uma média anual de 4,28%. Mais de 1 milhão e 500 mil empregos de carteira assinada foram gerados nesse período, representando um aumento de 170% de trabalhadores dependentes da construção civil brasileira (FIRJAN, 2014). Por outro lado, a produção e descarte de resíduos de construção é responsável por um dos principais impactos ambientais do planeta. De acordo com o Relatório de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2007), foi gerado uma quantidade de 160 milhões de toneladas de entulho no ano de 2007, dos quais dois terços seriam provenientes do setor da construção civil. Estima-se que apenas 20 a 30% desses resíduos foram recuperados em operações de reaproveitamento e reciclagem.

Nesse cenário, a procura por materiais alternativos como opção sustentável para o campo da engenharia civil cresceu consideravelmente no último século. Com isso, a utilização de subprodutos industriais, que antes não possuíam destinação específica, passou a ser uma possibilidade para diversas aplicações. Santos, Fontes e Lima (2017) afirmam que os materiais sustentáveis são uma alternativa que contribui para uma importante redução do impacto ambiental na produção de elementos construtivos. Por esses motivos, existe uma iniciativa em ascensão que visa possibilitar a incorporação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) nos materiais construtivos. Além disso, os resíduos industriais dos setores metalúrgico, de mineração e petróleo, de composições poliméricas e vítreas, as escórias da indústria de granito e mármore e os subprodutos das estações de tratamento de esgoto também poderão compor a matriz dos materiais de construção (PIETROBELLI, 2010). Dessa forma, a indústria da construção civil poderá reaproveitar os seus próprios resíduos gerados e ainda os resíduos de outros setores industriais à medida que se avança gradativamente com o aprimoramento dos estudos sobre essa temática.

Entre esses possíveis elementos sustentáveis, destaca-se o concreto composto por porcentagens de agregado residual proveniente de sobras de materiais de construção e demolição. No Brasil, a Resolução Conama nº 307 de 2002, define os Resíduos de Construção e Demolição como aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições, resultantes da preparação e da escavação de terrenos (CONAMA, 2002). No entanto, a composição do RCD é muito variável, e

depende de diversos fatores, dos quais: a técnica construtiva utilizada, a fase da obra, o estágio de desenvolvimento da indústria, a mão de obra e cultura do país e a disponibilidade de materiais no local. A Tabela 1.1, adaptada de Espinelli (2005), apresenta as taxas de desperdício de materiais construtivos no Brasil, em valores mínimos e máximos, devido à essa grande oscilação de dados relativos aos componentes do RCD.

Tabela 1.1: Taxas de desperdício de materiais de construção no Brasil

Material	Taxas de desperdício(%)		
	Média	Mínima	Máxima
Concreto Usinado	9	2	23
Aço	11	4	16
Blocos e Tijolos	13	3	48
Placas Cerâmicas	14	2	50
Revestimento Têxtil	14	14	14
Tubos	15	13	18
Eletrodutos	15	13	18
Tintas	17	8	56
Fios	27	14	35
Gesso	30	14	120

Fonte: ESPINELLI, 2005.

Ainda que de composição variada, Carneiro *et al.* (2001) afirmam que a classificação do RCD é em torno de 90% de natureza mineral, como: concretos, argamassas, rochas, cerâmica, solos, entre outros. A incorporação desses resíduos como agregado para produção de concreto é uma possível alternativa sustentável. Pesquisadores relatam resultados positivos em diversas substituições testadas. Leite (2001) avaliou as propriedades mecânicas de concretos com agregados reciclados de RCD. Cabral *et al.* (2009) desenvolveram protótipos de concreto para estudar o desempenho a partir da incorporação de agregados de cerâmica vermelha reciclada. Silveira *et al.* (2016) estudou o comportamento mecânico do concreto com resíduos de borracha de pneu e Pietrobelli (2010) explorou a adição de resíduo de polietileno, ou resíduo de garrafa pet, em misturas de concreto.

A incorporação de pozolana no cimento proporciona vantagens econômicas e estruturais, uma vez que interfere na matriz hidratada e incrementa a durabilidade e as propriedades físicas do concreto (MEDEIROS *et al.*, 2015). Marques, Chastre e

Nunes (2013), focaram no estudo sobre o aumento na resistência à carbonatação devido à adição pozolânica. Hodhod e Salama (2013) e Hoppe Filho et al. (2014), avaliaram o aumento da durabilidade em relação ao ataque por sulfatos, e Pacheco-Torgal e Jalali (2009), pesquisaram o efeito das pozolanas na durabilidade em ambientes ácidos.

Dessa forma, esse trabalho tem a função de avaliar a viabilidade econômica e ambiental de concretos ecoamigáveis compostos por porcentagens distintas de agregado proveniente de RCD e adição pozolânica através de uma análise comparativa que integre diferentes fatores estruturais, econômicos e ambientais.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Nunca houve tantos habitantes no planeta como atualmente. A população mundial atual é de 7,8 bilhões de pessoas e provavelmente continuará crescente por um longo período de tempo. Estima-se que até 2030 o mundo atinja o valor de 8,5 bilhões de habitantes e em 2050 possa chegar a 9,7 bilhões de seres humanos (ONU, 2020). Atualmente, a taxa de crescimento da população mundial é de 1,1% ao ano, e esse aumento também eleva um dos maiores desafios da prosperidade humana: o custo ambiental.

A construção civil assume protagonismo nesse cenário, por ser um setor altamente consumidor de recursos naturais e, assim, diretamente relacionado ao crescimento da população mundial. Quando considerado todo o ciclo de vida das edificações, a construção civil é responsável por ocupar 12% das terras do planeta, consumir 25% da água e gerar pelo menos 25% dos resíduos sólidos urbanos no mundo (UNEP, 2012).

Pode-se dizer que o concreto é o principal material estrutural utilizado no setor da construção civil mundial. O baixo custo e alta disponibilidade de seus componentes fazem do concreto uma das opções construtivas mais atrativas. Estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que resulta, segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por

ano, tornando-se o segundo material mais consumido no mundo, valor inferior apenas ao consumo de água por habitante por ano (IBRACON, 2009). Entre os componentes do concreto, o que possui maior custo ambiental é o cimento. Estima-se que o consumo global de cimento chegue a 4,42 bilhões de toneladas no ano de 2021, o que representa um consumo médio de 521 kg de cimento por habitante por ano (Global Cement Market, 2021).

Para minimizar o custo ambiental gerados pelo setor da construção, diversos estudos são direcionados ao concreto, a fim de melhorar as suas propriedades, e assim possibilitar um menor consumo de recursos e energia. Outro ramo desses estudos é através da substituição de alguns componentes do concreto que possuem alto grau de impacto ambiental por materiais mais ecológicos. Nesse sentido, a substituição parcial do cimento por adições minerais, como a cinza da casca de arroz, e o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição como uma porcentagem de agregado são possíveis alternativas para tornar o concreto mais sustentável e menos danoso ao planeta. Ainda assim, muitas vezes não se consegue manter as propriedades ideais do concreto, uma vez que a compensação exige o consumo de outros materiais de alta carga ambiental, como o cimento ou aditivos. Por mais esse motivo é importante o estudo nesta área a fim de que se consiga atingir resultados positivos tanto nas propriedades como em um menor impacto ambiental.

Uma das formas mais utilizadas para avaliar a sustentabilidade dos materiais é a Análise do Ciclo de Vida (ACV). Essa metodologia possibilita estimar os impactos ambientais de todas as fases do material analisado, desde a sua produção, toda a sua vida útil, até o seu descarte. A ACV leva em consideração os principais aspectos ambientais, como consumo de matéria-prima, água e energia, geração de resíduos e emissão de CO<sub>2</sub> (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2014).

No entanto, a relação custo/benefício também deve ser considerada. É fundamental que essas alternativas de concreto sejam economicamente viáveis e aplicáveis à realidade. Para isso, deve-se também entender o Custo do Ciclo de Vida (CCV), que consiste no levantamento dos custos de cada etapa envolvida na vida útil da unidade funcional do material em estudo.

Dessa forma, esse trabalho busca estimar o Custo do Ciclo de Vida de diferentes misturas de concreto compostas por substituição de RCD e adição



pozolânica e compor de forma unitária uma análise comparativa que também considere aspectos como impacto ambiental e propriedades estruturais apresentadas.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a sustentabilidade e o custo de diferentes misturas de concreto compostas por dois tipos de cimento (CP IV e CP V-ARI), adição de pozolana proveniente da queima da cinza da casca de arroz (CCA) e substituição de agregado por teores distintos de resíduos de construção e demolição (RCD), levando em consideração a análise do ciclo de vida em termos ambientais, econômicos e estruturais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência do RCD e da CCA na resistência à compressão axial e na durabilidade das amostras de concreto.
- Estimar o custo do ciclo de vida para cada um dos traços de concreto analisados.
- Estimar o impacto ambiental através da avaliação do ciclo de vida de cada um dos traços de concreto analisados.
- Identificar a porcentagem de substituição ideal de RCD que apresente a melhor relação custo financeiro x custo ambiental, quando comparado em base unitária padrão de resistência por ano ( $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{Ano}^{-1}$ )

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está apresentado na forma de artigo que foi submetido à revista Mix Sustentável no mês de junho de 2021. Este artigo foi baseado nos dados obtidos pela dissertação de Santos (2017) e está subdividido em três capítulos. O primeiro é composto pela introdução e por uma breve revisão bibliográfica dos conceitos abordados. O segundo capítulo apresenta o artigo submetido na íntegra e

o terceiro, de conclusão, explora os resultados com a intenção de atender os objetivos estabelecidos e discute possíveis recomendações para continuidade no desenvolvimento de pesquisas acerca do tema. Por último, seguem as referências bibliográficas utilizadas.

## 2. ARTIGO SUBMETIDO

### 2.1 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 (OPC), 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 (CO<sub>2</sub>) antropogênico lançadas na atmosfera por ano, valor que supera até mesmo a indústria de alimentos. Von Bahr *et al* (2002) estimam que a produção de cimento pode representar 10% de todas as emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.

De acordo com a Resolução Conama n° 307 de 2002, os Resíduos de Construção e Demolição contêm frequentemente materiais volumosos e pesados tais como: concreto, madeira, gesso, metais, tijolos, vidros, plásticos e componentes de construção recuperados (CONAMA, 2002). 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 subproduto agrícola derivado da casca do arroz. 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. Para compreender melhor os componentes desse subproduto, realizou-se uma breve revisão bibliográfica entre 10 autores que citaram a composição química da CCA em seus estudos.

De acordo com a Tabela 2.1, nota-se que todos os autores relataram a cinza da casca de arroz como um material rico em sílica, contendo em média 90% de  $\text{SiO}_2$ . A quantidade de sílica é fundamental para um bom desempenho na substituição do cimento. A reação do  $\text{SiO}_2$  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.

Tabela 2.1: Composição química da Cinza da Casca de Arroz (CCA)

Referência	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	Perda ao fogo
Chopra <i>et al</i> (2015)	94.00%	1.20%	0.37%	2.93%	0.60%	0.50%	-	-
Rego <i>et al</i> (2015)	87.08%	0.01%	0.11%	0.70%	0.42%	1.40%	0.18%	8.03%
Gastaldini <i>et al</i> (2014)	93.54%	0.52%	0.20%	0.79%	0.49%	1.65%	0.12%	3.39%
Thanh Le <i>et al</i> (2014)	86.81%	0.50%	0.87%	1.04%	0.85%	3.16%	0.69%	4.60%

Suam-lam, Makul (2013)	93.44%	0.21%	0.18%	0.76%	0.43%	1.98%	0.05%	1.27%
Zerbino <i>et al</i> (2011)	95.04%	0.30%	0.44%	1.25%	0.45%	1.40%	0.09%	0.51%
Chao-Lung <i>et al</i> (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%
Genesan <i>et al</i> (2008)	87.32%	0.22%	0.28%	0.48%	0.28%	3.14%	1.02%	2.10%
Della <i>et al</i> (2002)	94.95%	0.39%	0.26%	0.54%	0.90%	0.94%	0.25%	0.85%
<b>Média:</b>	<b>90.13%</b>	<b>0.40%</b>	<b>0.34%</b>	<b>0.95%</b>	<b>0.56%</b>	<b>1.82%</b>	<b>0.29%</b>	<b>4.17%</b>

Fonte: Autor

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 CO<sub>2</sub> (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 do uso de processos minuciosamente descritos e de bancos de dados com valores atualizados. A análise do CCV em conjunto com a ACV-m permite relacionar tanto aspectos econômicos como ambientais e 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, foi possível definir qual é a opção de mistura e o teor ideal de substituintes que melhor integra custo, sustentabilidade, tempo de vida e propriedades estruturais do concreto.

## 2.2 METODOLOGIA

### 2.2.1 Composição

Foram desenvolvidas diferentes misturas de concreto com a mesma resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) 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 ao 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, foi queimada a céu aberto e 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 2.2 e a quantidade de material por m<sup>3</sup> de concreto está descrito na Tabela 2.3. 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).

Tabela 2.2: Denominação e Composição dos traços.

<b>Traço</b>	<b>Composição</b>
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

Fonte: Autores

Tabela 2.3: Quantidade de materiais por m<sup>3</sup> de concreto.

<b>Traço</b>	<b>Cimento (kg)</b>	<b>CCA (kg)</b>	<b>Areia (kg)</b>	<b>Brita (kg)</b>	<b>RCD (kg)</b>	<b>Água (kg)</b>	<b>Aditivo (kg)</b>	<b>Clínquer no aglomerante (kg)</b>
TR IV	356,59	-	706,05	1026,64	-	174,73	-	225,15
15 RCD IV	381,71	-	64,18	889,39	156,507	171,77	0,38	241,01
30 RCD IV	483,46	-	46,31	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	58,50	176,12	0,57	408,24
30 RCD V	581,48	-	476,82	744,30	19,82	174,45	0,69	539,15
15RCD25 CCA V	255,84	63,96	775,20	900,57	58,62	173,97	0,25	237,21
30RCD25 CCA V	286,40	71,60	727,47	730,33	12,18	171,84	0,40	265,55

Fonte: Autores

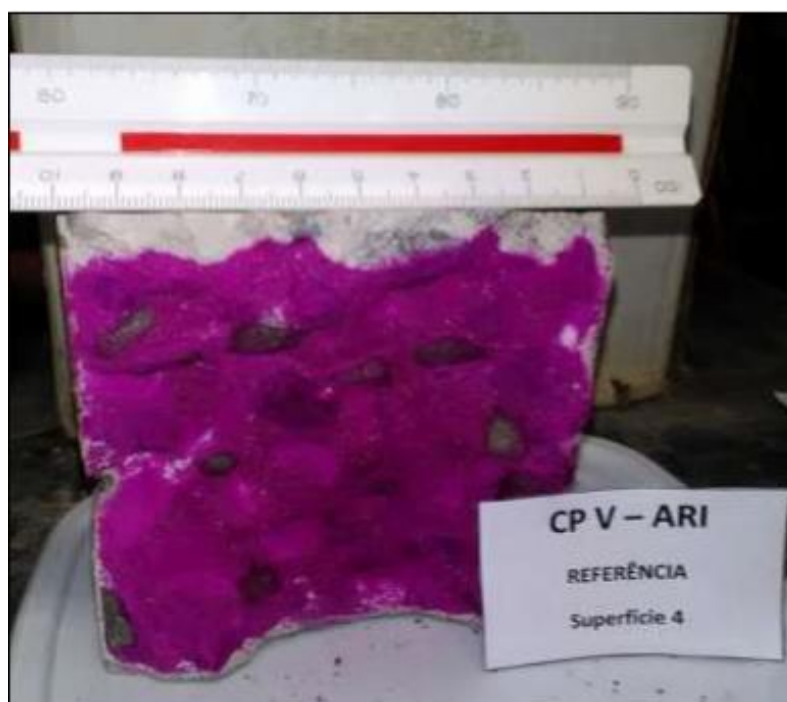
## 2.2.2 Testes de resistência e durabilidade

Os concretos foram avaliados quanto à resistência à compressão axial e de carbonatação acelerada a fim de embasar a análise do ciclo de vida e do custo-benefício em relação à durabilidade apresentada. O ensaio de compressão foi determinado através da norma NBR 5739/ 2018 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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 aspersion 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 de permanência na câmara de carbonatação, como demonstrado na imagem 2.1, e então calculadas as médias finais.

Imagem 2.1: Aspersion de fenolftaleína nas amostras



Fonte: SANTOS (2017)

### 2.2.3 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 seria 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 seria da classe de agressividade ambiental II e o cobrimento das armaduras seria de 25 mm. O volume total de concreto corresponde a 0,344 m<sup>3</sup> e o peso de aço do pilar fictício equivale a 21,40 kg, 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 vezes no coeficiente de carbonatação dos pilares pintados.

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 alguns 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 CO<sub>2</sub> fixada por cada pilar foi realizada através do método mais utilizado pela bibliografia (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, devido ao cobrimento da armadura;
- $c$  é a quantidade (kg/m<sup>3</sup>) de clínquer no aglomerante, descrito na tabela 2.2;
- $CaO$  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  $CaCO_3$ , assumido 0,75 (LAGERBLAD, 2006);
- $A$  é área de concreto exposta (m<sup>2</sup>);  $M$  é a fração molar química adimensional de  $CO_2/CaO = 0,79$  (Collins, 2010).

#### 2.2.4 Custos e impactos ambientais

A Avaliação do Ciclo 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 CO<sub>2</sub> 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. 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 ( $f_{c28}$ ) e pela vida útil, em anos, que cada mistura de concreto apresentou.

Para realizar os cálculos de custo de vida, utilizou-se a TCPO (2008), com preços de 2017 e percentual de encargos sociais de 117,66 %, de acordo com o Sistema Nacional de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).

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.

## 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 2.3.1 Compressão e Carbonatação

A Tabela 2.4 apresenta a profundidade média de carbonatação e os valores de resistência encontrados.

Tabela 2.4: Resistência a Compressão e Profundidade média de Carbonatação

MISTURA	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)			PROFUNDIDADE (mm)			
	fc28	fc91	a/mc	SEMANAS			
				4	8	12	16
TR IV	30,2	37,3	0,49	11,82	13,13	15,50	18,28
15 RCD IV	30,0	35,4	0,45	10,49	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

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. O mesmo não ocorreu com a amostra que teve menor relação  $a/mc$  (0,35) e cimento CP IV, uma vez que a presença da pozolana no cimento proporciona reações mais hidratadas e compensa a perda de trabalhabilidade. Quando houve adição de pozolana nas misturas com CP V, as amostras apresentaram profundidade carbonatada semelhante ao traço referência, com valores inferiores nas semanas finais.

### **2.3.2 Vida útil**

Através das médias das profundidades de carbonatação, foi possível traçar retas de tendência onde a inclinação é o coeficiente de carbonatação ( $K_c$ ), 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 cobertura 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.

Tabela 2.5: Vida útil de cada um dos pilares

<b>Traço</b>	<b>Kc</b>	<b>Tempo Estimado Teórico (anos)</b> $t=(x/Kc)^2$	<b>Kc com pintura (Kc/2,5)</b>	<b>Tempo Estimado Provável (anos)</b>
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
15RCD25CCA V	3,66	29	1,46	150
30RCD25CCAV	2,65	56	**	56

\* Vida útil máxima considerada \*\*Somente Lavagem

Fonte: Autor

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 que exige pintura para manutenção.

### 2.3.3 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 2.6 descreve os custos de cada tipo de pilar.

Tabela 2.6: Composição dos custos de ciclo de vida estimados para cada unidade

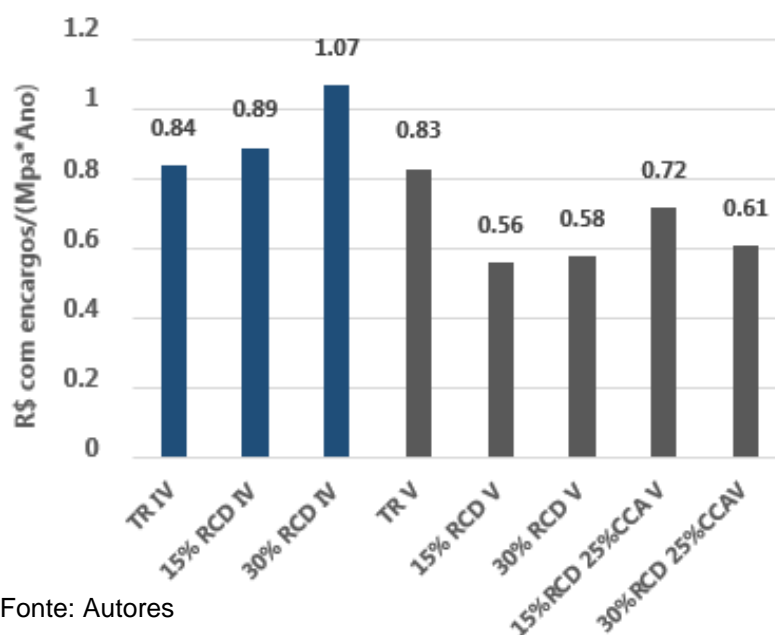
Etapas	Custo de ciclo de vida, incluindo encargos sociais (R\$/Pilar)							
	TR IV	15% RCD IV	30% RCD IV	TR V	15% RCD V	30% RCD V	15%RCD+ 25CCA V	30%RCD+ 25CCAV
CONSTRUÇÃO	519,39	524,04	542,25	514,67	552,00	582,74	461,83	521,68
PINTURA	3240,70	2441,33	1209,86	2851,82	0,00	0,00	3240,70	0,00
LAVAGEM	0,00	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
<b>TOTAL</b>	<b>3826,1</b>	<b>3031,4</b>	<b>1818,1</b>	<b>3432,5</b>	<b>2577,4</b>	<b>2608,1</b>	<b>3768,5</b>	<b>1319,2</b>

Fonte: Autores

Observa-se que os processos de manutenção (pintura e lavagem) foram significativos para a composição do custo final das unidades, sendo a pintura 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 2.2 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).

Figura 2.2: Custo unitário de cada pilar



Fonte: Autores

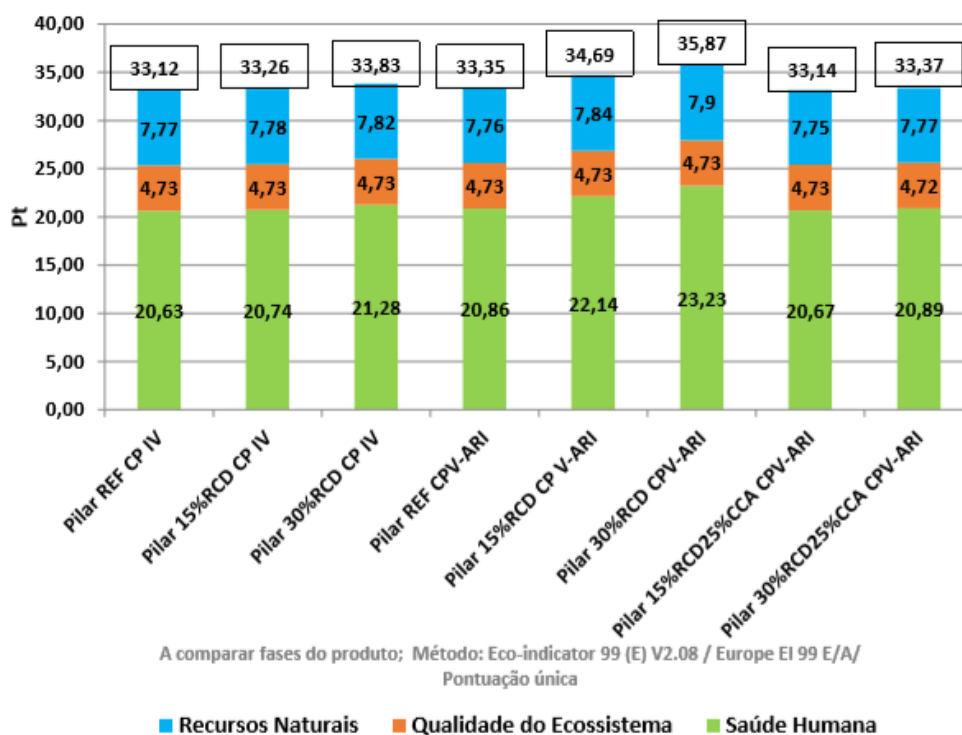
A unidade que apresentou o maior custo unitário foi a que continha 30% RCD e cimento CP IV, embora essa tenha apresentado um dos menores custos totais. Esse elevado valor unitário é decorrente do alto coeficiente de carbonatação apresentado (6,64), que resultou em um dos menores tempos de vida útil provável (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.

### 2.3.4 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 2.3 é proveniente da análise realizada pelo 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).



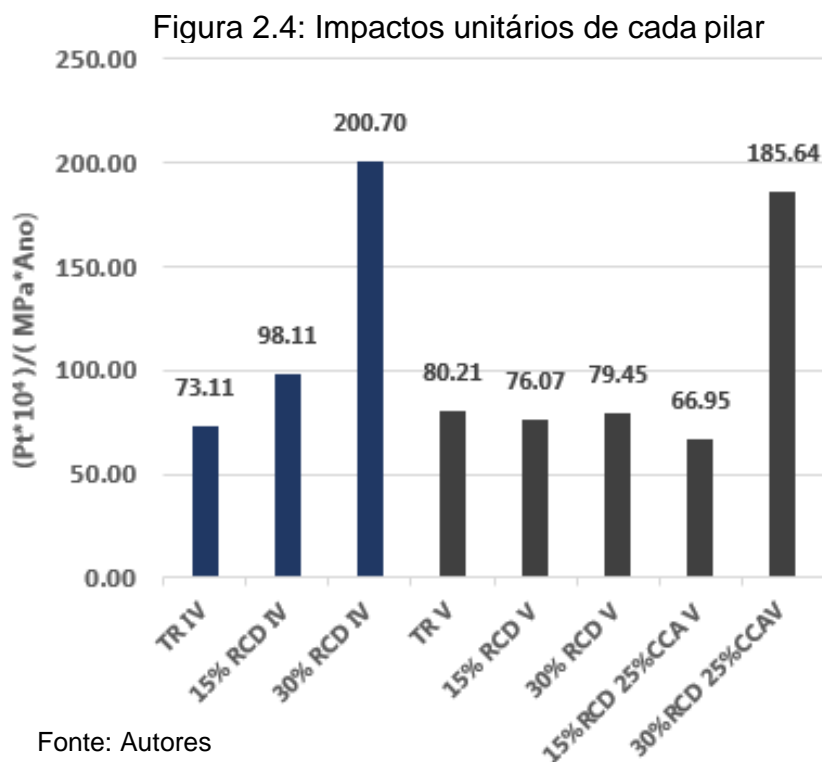
Figura 2.3: Impactos totais de cada pilar



Fonte: Software SimaPro 8.4

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 à 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.

Assim como feito no estudo de custo, a fim de realizar uma análise mais detalhada e realista, elaborou-se a figura 2.4, 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  $10^4$  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 (CO<sub>2</sub>eq), 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 CO<sub>2</sub> para produção de cada pilar. A quantidade absorvida de CO<sub>2</sub> 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 2.7.

Tabela 2.7 Gás Carbônico Equivalente (CO<sub>2</sub>eq)

Traço	Emissão de CO <sub>2</sub> (kg/pilar)	Absorção de CO <sub>2</sub> (kg/pilar)	CO <sub>2</sub> 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
15RCD25 CCA V	473,43	9,42	464,01
30RCD25 CCA V	478,25	10,55	467,70

Fonte: Autores

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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>eq (503,36 kg e 486,29 kg) também são as que apresentaram menor relação água/material cimentício (0,30 e 0,40).

### 2.3.5 Análise global: Custos x Impactos

Com o intuito de estabelecer uma análise mais completa e abrangente dos resultados, elaborou-se a Tabela 2.8 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.

Tabela 2.8: Média geométrica dos índices de custo e impactos unitários

Traço	Custo Unitário (R\$*MPa <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Índice do Custo Unitário ( $I_c$ )	Impacto Unitário (Pt*10 <sup>4</sup> *MPa <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Índice do Impacto Unitário ( $I_a$ )	Média Geométrica $\sqrt{(I_a * I_c)}$
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
<b>TR V</b>	<b>0,83</b>	<b>1,00</b>	<b>80,21</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
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
15RCD 25CCA V	0,72	0,87	66,95	0,83	0,85
30RCD 25CCA V	0,61	0,73	185,64	2,31	1,30

Fonte: Autores

Observa-se que os pilares com cimento CP IV e substituição do agregado graúdo por RCD não apresentaram ganhos na relação sustentabilidade x custo, obtendo-se um aumento da média geométrica (MG). 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.

Através dos resultados apresentados 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 sustentabilidade x custo. No entanto, a presença de RCD no concreto com cimento CP IV não é benéfica, uma vez que eleva tanto o custo quanto o impacto unitário. Quando o cimento CP V é substituído parcialmente pela cinza da casca de arroz, é possível obter ganhos na relação sustentabilidade x 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, sustentabilidade, 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. Essa metodologia resultou em alta variação da relação água/material cimentício entre as amostras, principalmente nas misturas com 15% e

30% de RCD com cimento CP V, que não apresentaram fenômeno de carbonatação e destoaram das outras amostras.

---

### 3 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a sustentabilidade e o custo de diferentes misturas de concreto compostas por dois tipos de cimento (CP IV e CP V-ARI), adição de pozolana proveniente da queima da cinza da casca de arroz (CCA) e substituição de agregado por teores distintos de resíduos de construção e demolição (RCD). Para atingir este objetivo, realizou-se a avaliação do ciclo de vida de cada amostra, que permitiu estimar os impactos ambientais e os custos, seguido por uma análise comparativa unitária das diferentes misturas estudadas.

As misturas de cimento Portland pozolânico (CP IV) que continham RCD não apresentaram vantagens econômicas ou ambientais, uma vez que a vida útil dessas misturas foi progressivamente diminuída à medida que se aumentava o teor de RCD, resultando em maior custo e maior impacto unitário. Em relação às misturas com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), a presença do RCD contribuiu para minimizar o custo e o impacto unitário, já que apresentou os maiores valores de vida útil estimada. Porém a relação água/material cimentício ( $a/mc$ ) também foi significativamente diminuída a fim de compensar a queda de resistência ocasionada pela substituição do agregado graúdo pelo material de demolição, o que indicou uma avaliação nula do fenômeno de carbonatação. Essa baixa relação  $a/mc$  nas amostras 15%RCD CPV e 30% RCD CPV também foi responsável pelas duas maiores taxas de gás carbônico equivalente (503,36 kg e 486,29 kg), tendo relação direta com o consumo de cimento. A substituição de cimento por CCA só foi positiva em misturas com baixo teor de RCD (até 15%), mas quando comparado ao mesmo traço sem a presença de CCA, percebe-se que a vantagem seria apenas no quesito ambiental, e torna-se mais onerosa uma vez que a presença da CCA diminui a durabilidade e exige a necessidade dos custos de pintura para atingir o tempo de vida útil máximo.

Além do viés econômico x ambiental, um dos objetivos específicos abordou a análise da influência do RCD e da CCA na resistência à compressão axial e na durabilidade das amostras de concreto. A resistência à compressão aos 28 dias não apresentou variação significativa entre as amostras, mantendo valor médio de 30,8 MPa. Ao aumentar o tempo de cura para 91 dias, o maior valor atingido foi da mistura referência com cimento CP V (39,1 MPa) e quanto maior a porcentagem de substituição de agregado residual, mais acentuada foi a queda na resistência. As duas amostras com maior porcentagem de RCD (30%) também apresentaram os menores

valores de resistência à compressão aos 91 dias. 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 pelo aumento na porcentagem de RCD.

A durabilidade foi estimada através da profundidade de carbonatação. As amostras com cimento CP IV apresentaram maiores profundidades, conseqüentes da maior relação a/mc. Já para as amostras com cimento CP V, a substituição de agregado natural por RCD exigiu uma elevada concentração de material cimentício, que afetou a profundidade de carbonatação e resultou em ausência desse fenômeno. Por esse motivo, não foi possível relacionar comparação com as amostras que possuíam adição de pozolana e mesmo teor de agregado residual.

O segundo objetivo específico era estimar o custo do ciclo de vida para cada um dos traços de concreto analisados. Os processos de manutenção (pintura ou lavagem) foram significativos para compor o custo final de cada amostra. Todas as misturas que necessitaram de pintura apresentaram custo unitário superior às que necessitaram apenas de lavagem. Dessa forma, o valor da vida útil teórica assumiu protagonismo no viés econômico, uma vez que definiu a necessidade de pintura como manutenção dos pilares estudados.

O terceiro objetivo específico foi estimar o impacto ambiental através da avaliação do ciclo de vida de cada um dos traços de concreto analisados. Todas as misturas que tiveram substituição de agregado graúdo por RCD apresentaram valores de impacto total superiores aos seus traços referência. Essa tendência é compatível ao maior consumo de cimento que as misturas com teores de RCD exigem, gerando maior impacto total. Contudo, o impacto unitário está claramente relacionado ao tempo de vida útil. As três amostras que apresentaram menor vida útil (56; 56 e 113 anos) também apresentaram os maiores impactos unitários (200,7; 185,6 e 98,1  $\text{Pt} \cdot 10^{4*} \text{MPa}^{-1} \text{ano}^{-1}$ )

Por fim, o último objetivo específico propôs identificar a porcentagem de substituição ideal de RCD que apresentasse a melhor relação custo financeiro x custo ambiental, quando comparado em base unitária padrão de resistência por ano ( $\text{MPa} \cdot \text{Ano}^{-1}$ ). A amostra que continha 15% de RCD, cimento CP V-ARI e nenhuma adição pozolânica foi a que apresentou melhor integração custo x benefício, devido ao seu baixo custo unitário (67% do custo da amostra trivial) e razoável impacto unitário (95% do impacto trivial). Já a amostra com 15% RCD, cimento CP V-ARI e 25% de cinza



da casca de arroz obteve o menor impacto unitário (83% do impacto da amostra trivial) entre as oito amostras estudadas. Logo, sugere-se a porcentagem de substituição ideal de 15% de agregado residual, visto que porcentagens com 30% de RCD revelaram piores resultados.

### 3.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros a partir da metodologia desenvolvida neste trabalho:

- Quanto à metodologia, sugere-se que futuros estudos realizem os testes de carbonatação, e consequente estimativa do tempo de vida útil, 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.
- Para fins de comparação, sugere-se avaliar o custo e o ciclo de vida de misturas de concreto compostas por outros materiais sustentáveis, tais como geopolímeros, adições minerais, areia reaproveitada da fundição, materiais reciclados, entre outros.

## REFERÊNCIAS

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.

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

CABRAL, A. E. B.,SCHALCH, V.,DAL MOLIN, D. C. C.,RIBEIRO, J. L. D.,RAVINDRARAJAH, R. S. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha.** *Cerâmica*, 55 (336), 448-460. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132009000400016>, 2009.

CARNEIRO, A. P. et al. **Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado.**In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, 2000, Salvador. Anais... Salvador: UFBA, 2001.

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.

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.

ESPINELLI, U. **A gestão do consumo de materiais como instrumento para a redução da geração de resíduos nos canteiros de obras.** In: Seminário de gestão e reciclagem de resíduos da construção e de-molição — avanços e desafios, 2005, São Paulo. Anais...São Paulo: PCC USP, 2005. 1 CD-ROM.

Federação das Indústrias do Rio de Janeiro – FIRJAN (2014), **Construção Civil: Desafios 2020.** FIRJAN, Rio de Janeiro

GLOBAL CEMENT MARKET. **Cement Production, Consumption, Imports Exports: Insight, Trends and Forecast (2019-2021)**. Konzept Analytics, 116 pages, 2019.

HODHOD, O. A.; SALAMA, G. **Simulating Modeling to Analyse the Effect of Mineral Admixture With Ordinary and Pozzolanic Cements on the Sulfate Resistance of Concrete**. Housing and Building National Research Center, v. 9, p. 109-117, 2013.

HOPPE FILHO, J. **Efeitos da Adição de cal Hidratada Sobre a Permeabilidade ao Oxigênio e Absorção Capilar de Concreto Com Altos Teores de Adições Minerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO. **Concreto: material construtivo mais consumido no mundo**. IBRACON, n°53, 2009.

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](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.

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](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)>. Acesso em 03 de junho de 2021.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA —IBGE. **Censo Demográfico 2010: sinopse do censo e resultados preliminares do universo**. 2011. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/impressao/ppts/0000000402.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/impressao/ppts/0000000402.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2021.

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

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

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.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 266p. Tese (Doutorado em Engenharia) –Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MARQUES, P. F.; CHASTRE, C.; NUNES, A. **Carbonation Service Life Modelling of RC Structures For Concrete With Portland and Blended Cements**. Cement and Concrete Composites, v. 37, n. 3, p. 171-184, 2013.

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

MEDEIROS, M. H. F. de; HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. **Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 19-29, jul./set. 2015.

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

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

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

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

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **2020 World Population and Housing Census Programme**. Suíça, 2020.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. **Sulphuric Acid Resistance of Plain, Polymer Modified, and Fly Ash Cement Concretes**. Construction and Building Materials, v. 23, p. 3485-3491, 2009

PADE, C ; GUIMARÃES, M. **The CO<sub>2</sub> uptake concrete in a 100 years perspective**. Cement and Concrete Research. V 37, n 9, p 1348- 1356, 2007.

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

PIETROBELLI, E. R. **Estudo de viabilidade do pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência à compressão**. Trabalho de monografia, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, SC, Brasil, 2010.

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.

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

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.

SANTOS, D. O. J., FONTES, C. M. A., LIMA, P. R. L. (2017). **Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal**. *Matéria* (Rio J.), 22 (1), e11801. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0133>

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.

SILVEIRA, P. M.,ALBUQUERQUE, M. C. F.,CASSOLA, S.,BORTOLUCCI, A. A.,PAULLI, L.,VILLA, F. M. D. **Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu**. *Matéria* (Rio J.), 21 (2), 416-428. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620160002.0039>, 2016.

SINGH. B. **Rice Husk – An Overview**. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete. Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, India, 2018.  
UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY — **EPA. The national biennial RCRA hazardous waste report**. 2007. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/inforesources/data/br07/natio-nal07.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2021

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

UNEP; SBCI. **Common Carbon Metric for Measuring Energy Use and Reporting Greenhouse Gas Emission from Building Operations**. 2012. Disponível em: <<http://www.unep.org/sbci/pdfs/unepsbcicarbonmetric.pdf>>. Acesso em: 09 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.