



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PISOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO  
PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS

Anna Carolina de Paula Sermarini

Projeto de Projeto de Graduação  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Ambiental da Escola Politécnica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Oscar A. Mendoza

Co-orientador: Monica Pertel

Rio de Janeiro

Dezembro de 2018

Sermarini, Anna Carolina de Paula

Avaliação do ciclo de vida de pisos intertravados de concreto produzidos com agregados reciclados/ Anna Carolina de Paula Sermarini – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018.

X, 58 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Oscar A. Mendoza.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Ambiental, 2018.

Referências Bibliográficas: p 53-58

1. ACV 2. Ciclo de Vida 3. Agregados Reciclados  
I.A. Menonza, Oscar. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental;  
III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

De maneira geral, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu querido orientador Oscar A. Mendoza por toda paciência, apoio e conhecimento transmitido ao longo do desenvolvimento do trabalho.

À Monica Pertel que abraçou a causa e dedicou-se ao trabalho mesmo com tantos compromissos.

Ao laboratório NUMATS e toda sua equipe que proporcionaram a estrutura e a oportunidade de realização de iniciação científica, onde pude ter os primeiros contatos com o mundo científico e de pesquisa.

Aos meus pais, Margareth de Castro Paula e Wilson Plácido Sermarini que sempre apoiaram todas as minhas escolhas e vibravam muito a cada conquista.

Ao meu irmão Tiago de Paula Muniz, que foi o grande responsável por me orientar quanto à escolha deste curso, e por ser a grande inspiração da minha vida

Agradeço as minhas amigas que sempre me estimularam e estiveram presentes para me distrair e me animar.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

## AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PISOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS

Anna Carolina de Paula Sermarini

Dezembro/2018

Orientador: Oscar A. Mendoza / Monica Pertel

Curso: Engenharia Ambiental

O setor da construção civil gera significativos impactos ao meio ambiente em todo seu ciclo de vida, sendo um grande consumidor de recursos naturais e representa uma considerável participação na taxa de emissão de poluentes, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Uma possibilidade de redução dos impactos dos concretos é a substituição parcial dos agregados naturais por agregados reciclados. Neste trabalho, foi estudado o impacto ambiental da produção de pisos intertravados de concreto utilizando agregados reciclados como substituição ao agregado natural, bem como os impactos associados ao concreto comumente utilizado na construção civil (concreto de referência – com pó de pedra). Os agregados reciclados estudados foram obtidos de resíduos de construção e demolição (RCD) provenientes de concretos moídos (RCD cinza) oriundos da demolição de parte do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF) da UFRJ e de tijolos cerâmicos maciços moídos (RCD vermelho). Para a mensuração dos impactos ambientais destes novos produtos, aplicou-se a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, estabelecida pela ISO 14040, através de um desenvolvimento manual e outro com a utilização do *Software SimaPro*. A fronteira de estudo ao sistema foi “do berço ao portão” em que se avaliou desde a obtenção de matérias-primas até a produção dos pisos. A unidade funcional adotada foi m<sup>3</sup> de unidades de pavimento pela resistência à compressão medida em MPa. O método CML-IA foi utilizado na Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e a categoria emissão de CO<sub>2</sub> foi escolhida para análise. Os resultados apontam que o concreto de referência (sem RCD) apresentou maiores emissões de CO<sub>2</sub> que os concretos substituídos parcialmente. Além disso, dar uma destinação adequada a estes resíduos representa um benefício ambiental significativo.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida. Resíduos de construção e demolição. Emissão de CO<sub>2</sub>.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## LIFE CYCLE ASSESSMENT OF CONCRETE PRODUCED WITH RECYCLED AGGREGATES FOR PRE-CAST PAVING UNITS

Anna Carolina de Paula Sermarini

December/2018

Advisor: Oscar A. Mendoza

Department: Environmental Engineering

The construction industry is responsible for the environment throughout its life cycle, being a major consumer of natural resources and representing a huge participation in emission rates of pollutants, such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). A possibility to reduce the impact of concrete is a partial replacement of the natural aggregates by recycled aggregates. This study, was seen to the environmental of the intertravated concrete floors in the private plant, in the civil association with earth and concrete compounds in the construction of the concrete in the concrete civil in the concrete civil in Portuguese. The recycled aggregates studied came from construction and demolition residues (RCD) derived from ground concrete (RCD gray) from the demolition of University Hospital Clementino Fraga Filho (HUCFF) of UFRJ and from ground ceramic bricks (red RCD). For the measurement of the residues of the new products, a methodology of Life Cycle Assessment was applied, through ISO 14040, through an instruction manual and another using the SimaPro Software. The database for the system was "from gate to gate", which evaluated from the origin of the raw materials to the production of the floors. The functional unit adopted was m<sup>3</sup> of paving units for the units of measurement in MPa. The CML-IA method was used in the Life Cycle Assessment (AICV) and a CO<sub>2</sub> emission emission was chosen for analysis. Indicators that can be identified in concrete form (without RCD) are subject to CO<sub>2</sub> emission as partially replaced concrete. In addition, proper disposal of these wastes represents a significant environmental benefit.

**Keywords:** Life Cycle Assessment. Constuction and demolation waste. CO<sub>2</sub> Emission.

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral.....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Estrutura do trabalho.....	3
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
2.1 O concreto e seus constituintes.....	4
2.2 Os impactos ambientais do concreto.....	7
2.3 Agregados Reciclados.....	10
2.4 Resíduos.....	11
2.4.1 Fontes geradoras de RCD.....	13
2.4.2 Ganhos no impacto ambiental.....	14
2.4.3 Desafios.....	15
2.5 Avaliação do Ciclo de Vida.....	16
2.5.1 Metodologia.....	17
2.5.2 Objetivo e escopo.....	19
2.5.3 Análise de inventário do Ciclo de Vida (ICV) .....	20
2.5.4 Avaliação de Impacto.....	20
2.5.5 Interpretação dos resultados.....	21
<b>3. Material e Métodos.....</b>	<b>23</b>
3.1 Definição do Objetivo e Escopo.....	23
3.2 Inventário do Ciclo de Vida.....	25
3.3 Análise do Ciclo de Vida.....	32
3.3.1 ACV “Manual”.....	32
3.3.1.1 Fator de emissão de CO <sub>2</sub> dos agregados reciclados.....	33
3.3.1.2 Emissão total de CO <sub>2</sub> das unidades de pavimento.....	34
3.3.2 ACV com <i>SimaPro</i> .....	37
3.3.2.1 Dados de entrada do <i>SimaPro</i> .....	38

<b>4. Resultados.....</b>	<b>41</b>
4.1 ACV “manual”.....	41
4.2 <i>SimaPro</i> .....	45
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>50</b>
<b>6. Recomendações.....</b>	<b>52</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Concreto e seus constituintes .....	4
Figura 2: Resíduos de construção e demolição cinzas e vermelhos.....	12
Figura 3: Fonte de RCD: Demolição de obras de infraestrutura.....	13
Figura 4: Resíduos disposto próximos à margem de um córrego.....	15
Figura 5: Ciclo de vida de um produto.....	18
Figura 6: Estrutura da Avaliação do Ciclo de vida.....	18
Figura 7: Fronteira do sistema em estudo.....	24
Figura 8: Resíduos da demolição de parte do Hospital Universitário.....	25
Figura 9: Britador de mandíbulas móveis QUEIXADA 200 utilizado para triturar os RCD.....	27
Figura 10: Misturador Planetário utilizado para misturar os constituintes dos concretos.....	30
Figura 11: Blocos de pisos intertravados de concreto produzidos na vibroprensa.....	31
Figura 12: Emissão devido ao transporte das matérias-primas – ACV “manual”.....	42
Figura 13: Emissão devido à produção das matérias-primas – ACV “manual”.....	42
Figura 14: Emissão total dos blocos de concreto – ACV “manual”.....	44
Figura 15: Emissão total dos blocos de concreto por MPa – ACV “manual”.....	44
Figura 16: Emissão devido ao transporte das matérias-primas – ACV <i>SimaPro</i> .....	45
Figura 17: Emissão devido à produção das matérias-primas – ACV <i>SimaPro</i> .....	46
Figura 18: Emissão total dos blocos de concreto – ACV <i>SimaPro</i> .....	47
Figura 19: Emissão total dos blocos de concreto por MPa – ACV <i>SimaPro</i> .....	47
Figura 20: Diagrama de processos da produção de 1m <sup>3</sup> de concreto de referência – ACV <i>SimaPro</i> .....	48
Figura 21: Diagrama de processos da produção de 1m <sup>3</sup> de concreto cinza – ACV <i>SimaPro</i> .....	49
Figura 22: Diagrama de processos da produção de 1m <sup>3</sup> de concreto vermelho – ACV <i>SimaPro</i> .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distância do transporte das matérias-primas .....	36
Tabela 2: Fator de emissão utilizado na ACV “manual” .....	36
Tabela 3: Fator de emissão dos agregados reciclados. ....	37
Tabela 4: Quantidades de materiais em cada concreto .....	38
Tabela 5: Dados de Entrada dos materiais no <i>SimaPro</i> para o concreto de referência.....	39
Tabela 6: Dados de Entrada dos materiais no <i>SimaPro</i> para o concreto com RCDc.....	40
Tabela 7: Dados de Entrada dos materiais no <i>SimaPro</i> para o concreto com RCDv.....	40
Tabela 8: Resultados das emissões de transporte e produção de MP pelo ACV “manual” .....	41
Tabela 9: Resultados ACV “manual” .....	43
Tabela 10: Resultados das emissões de cada parcela pelo ACV com <i>SimaPro</i> .....	45
Tabela 11: Resultados ACV <i>SimaPro</i> .....	46

# 1. Introdução

Por utilizar vultuosos volumes de recursos naturais, a construção civil acarreta diversos danos ao meio ambiente. Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2018<sup>1</sup>), estima-se que 50% dos recursos materiais extraídos da natureza estão relacionados à atividade de construção civil. Para que medidas sejam tomadas para a melhoria da problemática, a quantificação dos impactos ambientais é fundamental. Com isso, se faz possível analisar como e quais os materiais apresentam menos prejuízos ao meio ambiente.

O crescimento das cidades e a demanda por obras de infraestrutura, construções, edificações e reformas levam à necessidade, cada vez maior, de materiais de construção com destaque para o concreto que é o material de construção mais utilizado no mundo. Dados apontam que o consumo anual de concreto esteja na ordem de 20 a 30 bilhões de toneladas (WBCSD, 2009, SABNIS, 2011, PETEK GURSEL et al., 2014), e segundo SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008, em cada ano é produzido mais de um metro cúbico por pessoa.

Para atender à requisição deste enorme consumo, a construção civil gera significativos impactos ao meio ambiente em todo seu ciclo de vida. Desde a extração das matérias-primas ao final de sua vida útil, passando pela fabricação dos insumos e transporte em todas as etapas, o processo produtivo da indústria cimenteira merece atenção. Este sistema é responsável por 5,3% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (QUERÉ et al., 2014), sendo que em 2012 produziu-se 3,7 bilhões de toneladas no mundo (SNIC, 2014).

O Acordo de Paris foi aprovado pelos 195 países Parte da UNFCCC para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto do desenvolvimento sustentável. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões

<sup>1</sup><https://abrecon.org.br/>

de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030.

À vista da problemática apresentada para atender à enorme demanda deste setor e à luz do desenvolvimento sustentável e proposições do Acordo de Paris, algumas alternativas vêm sendo estudadas e desenvolvidas para minimizar os impactos ambientais causados pela produção e uso do concreto. Uma das soluções é a substituição parcial de agregados naturais por outros materiais, como resíduos de construção e demolição.

Faz-se necessária a quantificação dos impactos desses novos produtos e uma análise para verificar se, de fato, são menos nocivos ao meio ambiente. As ferramentas de gestão ambiental, como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), surgem como utensílio para tais investigações. Através da mesma, é possível obter um diagnóstico dos potenciais impactos causados pelo produto alternativo e sua viabilidade ambiental.

Sendo assim, diante de todo exposto, o presente trabalho pretende trazer como contribuição um estudo sobre a substituição de agregados naturais por agregados reciclados em concretos para pisos intertravados a serem utilizados para a construção de uma ciclovia dentro do Parque Tecnológico – UFRJ.

## **1.1 Objetivo Geral**

Aplicar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida para analisar os potenciais impactos ambientais da substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclado em blocos de piso intertravados de concreto.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Comparar os impactos ambientais de pisos intertravados de concreto tradicional, com concretos produzidos por meio de agregados reciclados: resíduos de tijolo e cerâmica e resíduos de concreto.

- Aplicar e comparar dois tipos de metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida: uma desenvolvida manualmente com a utilização de dados fornecidos pela Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto (CBCS) e Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e a outra através do *Software Simapro*.
- Analisar as metodologias utilizadas e seus resultados obtidos para a categoria de impacto emissão de CO<sub>2</sub> aplicando a unidade funcional kgCO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> normalizada por MPa.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Esta monografia foi organizada em 6 capítulos, sendo o primeiro introdutório. O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica dos concretos e seus constituintes. Além disso, apresenta-se uma caracterização dos agregados reciclados, fora a exposição dos benefícios ambientais de suas aplicações e os desafios enfrentados para seu uso. Ainda no segundo Capítulo é apresentada a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV), propagada pelas normas ISO 14.040 e ISO 14.044.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada nesse estudo, baseada nas normas ISO. Apresenta a descrição dos concretos utilizados, as equações utilizadas e a descrição do *Software* adotado e os dados de entrada das metodologias.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com as duas metodologias aplicadas: a ACV “manual” e a ACV realizado com o *Software SimaPro* e base de dados *Ecoinvent*.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho realizado. Por fim, o capítulo 6 traz as recomendações para futuros trabalhos.

## 2. Revisão Bibliográfica

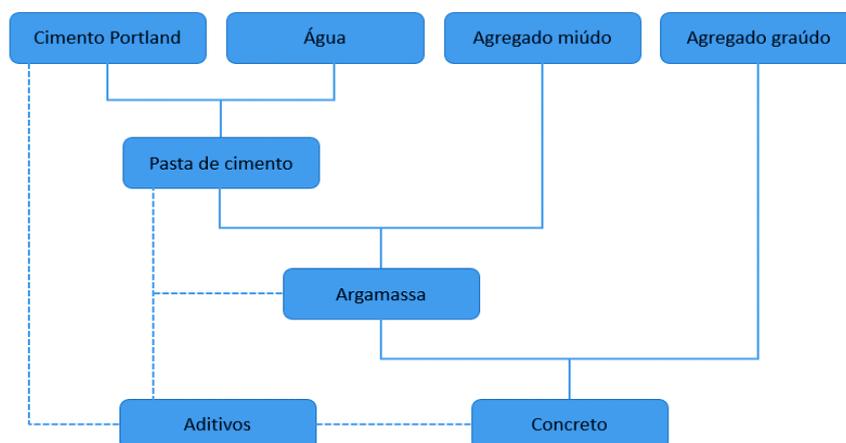
### 2.1 O concreto e seus constituintes

Nesta sessão será apresentado o concreto e seus principais constituintes, bem como os impactos ambientais associados ao seu ciclo de vida, que compreendem tanto os impactos ambientais individuais dos materiais que o compõe assim como os referentes aos transportes das matérias-primas.

O concreto é definido como qualquer produto ou massa produzido a partir de um meio cimentante, em amplo sentido. De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 12.655:2006, o concreto de cimento Portland é definido como:

“Material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água).”

A composição básica de um concreto comum é 12% de cimento, 8% de água de mistura e 80% de agregados, em massa. Muitos ainda apresentam aditivos minerais e químicos para melhorar algumas características como a resistência (METHA e MONTEIRO, 2008). A Figura 1 apresenta as nomenclaturas que são usualmente adotadas pela construção civil.



**Figura 1:** Concreto e seus constituintes

**Fonte:** ABCP, 2013

## **Cimento Portland**

O cimento Portland é produzido a partir de materiais carbonáticos, provindos de calcário e gesso, além de alumina e sílica. Para fabricá-lo, essas materiais primas são moídas e misturadas em proporções adequadas e queimadas em forno rotativo até a temperatura em torno de 1450 °C. Assim é produzido o clínquer, material básico necessário para a fabricação do cimento (CORDEIRO, 2006).

Esse processo exige um enorme consumo de energia, seja na forma térmica (calor) por meio de combustíveis usados para aquecer os fornos, seja na forma de energia elétrica, consumida durante todo o processo. Os combustíveis são em grande parte de origem não renovável como o petróleo e o carvão, e conseqüentemente, impactos ambientais como emissão de poluentes gasosos e material particulado estão associados às etapas de fabricação de cimento.

Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC 2014), o Brasil é o sexto maior produtor de cimento do mundo e representa 1,7% da produção mundial. Em primeiro lugar aparece a China, responsável por 60% da produção mundial. No ano de 2017, segundo o SNIC de 2017, a produção nacional foi de aproximadamente 54 milhões de toneladas.

## **Agregados Naturais**

Os agregados para uso na construção civil podem ser de origem natural, como a areia, cascalho ou pedregulho ou de origem artificial, produzidos por algum processo industrial (pedras britadas, areias artificiais, escórias de alto-forno, resíduos de construção e demolição, entre outros) (LUZ; ALMEIDA, 2012).

Segundo o Manual de Agregados para a construção civil (1ª ed.) os materiais naturais utilizados como agregados na construção civil são rochas consolidadas e sedimentos como areia e cascalhos. As rochas podem passar por processos de

britagem e moagem para atingir as especificações de granulometria exigidas pelas normas.

Os agregados para a construção civil são considerados os insumos mais consumidos no mundo e essenciais para as obras de construção, edificações e infraestruturas. São materiais granulares e de dimensões e propriedades definidas para seus usos (IBRAM, 2010).

Os agregados não entram em reações químicas complexas com a água. Além disso, apresentam custos relativamente baixos. Estudos apontam que a brita representa em média, 2% do custo global de uma edificação e 60% do seu volume. Sua extração se dá diretamente das jazidas por meio de explosivos e após esse processo ela é beneficiada e transportada aos centros consumidores (LUZ; ALMEIDA, 2012).

Segundo Ferreira (2013), os principais impactos associados aos agregados naturais são divididos em quatro grandes grupos: Consumo de recursos naturais; Consumo de energia; Geração de resíduos e perdas/desperdícios e Poluição ambiental.

As pedreiras, além de representarem uma briga quanto às suas ocupações versus ocupações urbanas, representam diminuição na qualidade de vida e geram transtornos para a população do entorno. Os aspectos negativos associados às atividades são (FERREIRA, 2013):

- Aumento de emissão de gases e partículas em suspensão no ar;
- Lançamento de fragmentos rochosos à distância;
- Vibração do solo;
- Aumento de ruídos;
- Mudança do uso de solo;

### **Agregados Miúdos**

A ABNT NBR 7211 traz como definição de agregado miúdo a areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos

grãos passam pela peneira ABNT de 4,75 mm e ficam retidos na peneira ABNT com abertura de malha de 150 µm.

Segundo AZEVEDO et.al. (2017), os agregados miúdos são os segundo materiais mais utilizados na produção de concreto, atrás apenas dos agregados graúdos. Os agregados miúdos contribuem para algumas características do concreto como: resistência à compressão, durabilidade, trabalhabilidade, retração entre outras.

O principal agregado miúdo natural utilizados na indústria de construção civil é a areia natural, extraída geralmente de leitos de rios e lagos (STAUDT, 2016).

### **Agregados Graúdos**

A ABNT NBR 7211 define agregados graúdos como agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Segundo LICETTI et.al. (2012) as características relevantes do agregado para a composição do concreto incluem: porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma, resistência à compressão e tipo de substâncias presentes. Essas características resultam da composição mineralógica da rocha, das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de produzir o agregado e o tipo de equipamento para a produção do agregado.

De acordo com o STAUDT (2016), os principais agregados graúdos naturais utilizados são os seixos rolados, as britas e o cascalho.

## **2.2 Os impactos ambientais do concreto**

Impacto ambiental é uma alteração física ou funcional em qualquer dos componentes ambientais. Pela definição da norma da ABNT NBR ISO 14.001:2004 impacto ambiental é: “qualquer modificação do ambiente, adversa ou benéfica, que resulte no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização”.

Essa modificação pode ser quantificada e qualificada, favorável ou desfavorável ao ecossistema ou à sociedade.

Os impactos ambientais associados à indústria de construção civil, em geral, são de grande relevância. Além do consumo de grandes quantidades de recursos naturais não renováveis, ocorrem as emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> relacionadas à produção de cimento (SILVA, 2015).

Os desafios ambientais decorrem da necessidade de se reduzirem os níveis mundiais de emissão de CO<sub>2</sub>, o consumo de energia e o uso de matérias-primas naturais destes setores industriais, a utilização de subprodutos industriais e de resíduos sólidos. Diante disso, o reaproveitamento dos resíduos vem ganhando espaço no ramo da construção civil.

### **Cimento Portland**

A indústria do cimento tem um elevado potencial poluidor em todas as etapas do processo de fabricação: desde a moagem e homogeneização das matérias-primas; produção de clínquer no forno rotativo; resfriamento do clínquer; moagem do clínquer; adições e produção de cimento, ensacamento e expedição; pontos de transferência de materiais (MAURY & BLUMENSCHEIN, 2012).

As emissões dessa indústria em nível mundial são estimadas em cerca de 5% do total das emissões antrópicas de carbono (WBCSD, 2010). No Brasil, a indústria de cimento foi responsável por 29,7% das emissões de CO<sub>2</sub> de processos industriais em 2012 (BRASIL, 2014).

Mundialmente, cerca de 90% das emissões de carbono da produção de cimento, é resultante da geração de energia térmica e da descarbonatação do calcário. Desse total, estima-se que a geração de energia térmica e a descarbonatação do calcário sejam responsáveis, respectivamente, por 40% e 50% das emissões. Os 10% restantes distribuem-se entre transporte e consumo de energia elétrica na fábrica (ABDI, 2012).

## **Agregados Naturais**

A indústria de agregados é responsável por aproximadamente 17% da produção mineral brasileira, sendo cerca de 6% desse total destinado à produção de areia e cascalho e o restante ao setor de pedra britada (TOLMASQUIN; SZKLO, 2000).

Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção civil (ANEPAC, 2014) o consumo de agregados em 2014 foi de 3,70 t/habitante. No ano de 2013, segundo esta mesma fonte, o consumo per capita brasileiro foi de 3,5 toneladas de agregados por habitante/ano, ou seja, houve um incremento de 5,7%. Comparativamente aos países desenvolvidos, o Brasil ainda está muito distante do valor médio histórico de 6 a 7 toneladas por habitante/ano (por exemplo, Estados Unidos).

Quando se analisa sob aspectos técnicos, os impactos gerados pela construção civil se agravam pelo uso e desenvolvimento insuficiente de novas tecnologias mais racionalizadas, desperdício de materiais e baixa qualificação profissional. O grande consumo de materiais e porcentagem alta de perdas ainda promovem um aumento no custo total dos empreendimentos (MALTA et al., 2013).

Esses autores explicitam ainda que o processo de beneficiamento de agregados utiliza, principalmente, a energia elétrica como força motriz para acionamento de motores elétricos, britadores, esteiras, peneiras vibratórias, caminhões para transporte e iluminação. A queima de combustível, utilizada para a produção dos agregados, também é responsável por emissões de gases CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> etc.

Diante de tais impactos gerados pela indústria da construção civil, estudos de viabilização da utilização de agregados reciclados para a produção de concreto vêm ganhando relevância.

### **2.3 Agregados Reciclados**

De acordo com LEITE (2001), agregado reciclado é definido como um material granular, resultante de um processo industrial envolvendo o processamento de materiais inorgânicos, previamente e exclusivamente utilizados na construção, e aplicados novamente neste setor.

Os agregados reciclados, são produzidos após beneficiamento e processamento dos resíduos, através de fases de cominuição (ou fragmentação – realizada através de britagem e moagem); separação por granulometria (comumente utiliza-se o método de peneiramento) e concentração (somente utilizada quando existem diversas classes minerais, com o objetivo de aumentar o teor de mineral útil) (AMARIO, 2015).

Segundo METHA e MONTEIRO (2008), as características mais importantes para se analisar a utilização de agregados reciclados na construção civil são a composição granulométrica, a forma e a textura, absorção de água, resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias com potencial de prejudicar presentes nos agregados.

Os resíduos de construção e demolição no Brasil, em 2013, representam 2/3 dos resíduos sólidos urbanos (chegando a representar o dobro do volume de resíduos domiciliares) segundo dados fornecidos pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2014) e são os materiais mais utilizados como agregados reciclados.

Dar uma destinação adequada a esses resíduos tem sido tema de discussão em diversos centros de pesquisa e seu uso na construção civil, principalmente como substituição de agregados naturais, tem sido difundido ao redor do mundo e não é diferente no Brasil.

## 2.4 Resíduos de Construção e Demolição

De acordo com a resolução CONAMA nº307 de 2002, os resíduos de construção civil, tem a seguinte definição:

“Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.

A mesma resolução, traz ainda algumas classificações para os Resíduos de Construção e Demolição (RCD):

- **Classe A** - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis utilizados como agregados, provenientes de construções, demolições, reformas e reparos de pavimentação ou edificações e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto. Ainda os provenientes de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.), produzidas nos canteiros de obras;
- **Classe B** - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- **Classe C** - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- **Classe D** - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas,

instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Os RCD têm uma composição que depende diretamente da fonte que o originou e do momento em que é obtida uma amostra. O setor de construção civil desenvolve diversas atividades dentro de canteiros de obras, que gera resíduos compostos por uma grande gama de materiais. Diante disso, o material a ser reciclado apresenta uma alta heterogeneidade, e sua separação total seria quase que impossível (LEITE, 2001).

Tal heterogeneidade, define outra classificação muito usada em usinas de reciclagem, que consiste na divisão dos resíduos em dois grandes grupos de acordo com a sua cor: cinza (produtos com predominância visual de materiais à base de cimento) e vermelho (produtos com predominância visual de materiais de natureza cerâmica) (RICCI, 2007).

A Figura 2 representa resíduos de construção e demolição misturados: resíduos de concreto, telhas, cerâmicas e tijolos.



**Figura 2:** Resíduos de construção e demolição cinzas e vermelhos

**Fonte:** Site do Ecotransambiental<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Disponível em: < <https://www.ecotransambiental.com.br/residuos> > em: 02 de out. de 2018

## 2.4.1 Fontes geradoras de RCD

Segundo a ABRELPE (2017), foram coletados cerca de 45 milhões de toneladas de RCD no país em 2017, representando em torno de 57% da massa total de resíduos sólidos urbanos gerados neste ano.

Dentro da cadeia produtiva da construção, o resíduo originado pode ter diversas fontes, de acordo com LEVY (1997), as origens são:

- Catástrofes naturais ou artificiais como terremotos, bombardeios, incêndios ou desabamentos;
- Demolição de estruturas ou pavimentos que já atingiram a vida útil para as quais foram projetadas, tendo se tornado obsoletas;
- Deficiências inerentes aos processos e sistemas construtivos empregados na atualidade.
- Todo e qualquer canteiro de obra.

A Figura 3 retrata uma fonte muito comum de RCD no Brasil: a demolição de construções.



**Figura 3:** Fonte de RCD: Demolição de obras de infraestrutura

**Fonte:** Site do nosso portal<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Disponível em: <<https://onossoportal.com.br/empresa/casarao-demolicao-demolicoes-e-materiais-de-construcao--goiania.html>> Acesso em: 18 de set. de 2018

Além dos resíduos de construção e demolição, outro agregado considerado “reciclado” já muito utilizado na construção civil é o pó de pedra, um rejeito da britagem das rochas.

A utilização do pó de pedra como agregado miúdo no concreto, não só por motivos econômicos, como por aspectos relacionados à durabilidade, vem sendo analisada e apresenta grandes interesses. As pedreiras necessariamente geram este rejeito, que antes não apresentava valor algum, e hoje vêm sendo comercializada, representando ganhos econômicos (MENOSSI, 2004).

#### **2.4.2 Ganhos no impacto ambiental**

Os impactos ambientais associados resíduos de construção e demolição e rejeitos de britagem são provenientes, principalmente, do significativo volume gerado e da sua disposição final inadequada, como em ruas, terrenos abandonados, encostas e leitos de rios.

Nomeadamente, pode-se citar os seguintes impactos: assoreamento de rios, obstruções de sistemas de drenagem, indução de escorregamentos, inundações à jusante, obstrução de ruas e outros (FERREIRA, 2013).

Em alguns países, existem regulamentações que proíbem e chegam a punir os responsáveis pela disposição inadequada de resíduos no meio-ambiente. No Reino Unido, existem algumas cobranças para a disposição de resíduos de concreto no meio-ambiente, o que incentiva as usinas de concreto pré-misturado a reduzir a quantidade de resíduo produzido. Na Inglaterra, o Estado cobra uma taxa da construtora da obra, por todo o resíduo gerado. Essa medida mostra que, a preocupação não é apenas com o desperdício em si, mas sim com o provável impacto que esse resíduo gerará no ambiente; caso esse resíduo seja previamente separado na obra, a taxa a ser cobrada será menor (SEALEY et al., 2001).

A Figura 4 retrata bem a realidade brasileira, em que ainda hoje, resíduos são dispostos em qualquer local e sem nenhuma preocupação com o meio ambiente.



**Figura 4:** Resíduos dispostos próximos à margem de um córrego

**Fonte:** Site do guia ecológico<sup>4</sup>

Desse modo, fica evidente que dar uma destinação adequada aos resíduos, inevitavelmente, gerados é demasiadamente necessária. A utilização desses materiais na produção de concretos representa um desígnio apropriado já que os reinsere em seu ciclo de vida.

Ganhos com a utilização de RCD como agregados reciclados, estão relacionados à melhoria da saúde da população que vive no entorno de despejos inadequados, prevenções de assoreamento de rios e obstruções de canais, bem como a valorização do local que antes tenha sido abrigo de resíduos.

### **2.4.3 Desafios**

Segundo MEHTA & MONTEIRO (2006), o maior obstáculo no uso dos resíduos de construção como agregado para concreto é o custo da britagem, graduação, controle do pó e separação dos constituintes indesejáveis.

<sup>4</sup>Disponível em: <<https://guiaecologico.wordpress.com/2009/10/01/entulho-uma-agressao-sem-tamanho>> Acesso em: 11 de out. de 2018.

Os agregados reciclados apresentam grande variação em suas propriedades dependendo da composição do resíduo processado, equipamentos usados, teor de impurezas, composição granulométrica etc. Além disso, tem propriedades específicas diferentes das propriedades dos agregados comuns, que determinam algumas diferenças nas condições de aplicação, dosagens e nas características de argamassas e concretos em que forem usados (PEDROZO, 2008).

Quanto aos agregados graúdos reciclados, recomendam o uso para uma resistência característica de até 20Mpa. Conforme KHATIB (2005) ao se substituir por agregado fino de tijolo a areia natural do concreto, não é causada uma redução substancial na resistência a longo prazo.

## **2.5 Avaliação do Ciclo de Vida**

### **Histórico**

Como já mencionado anteriormente, a conscientização quanto à proteção dos recursos naturais, do meio ambiente como um todo, e a identificação dos impactos ambientais associados à produtos e processos vêm ganhando grande importância nos últimos anos. Este fenômeno, desencadeou o desenvolvimento de métodos que auxiliam na melhor compreensão e tratamento destes impactos. Uma das técnicas existentes para tal é a avaliação do ciclo de vida (ACV).

Os primeiros estudos de ACV registrados foram motivados pela preocupação quanto à escassez de recursos e energias no final da década de 1960. Com a primeira crise do petróleo, a busca por novas formas de energia e a racionalização do uso de fontes não renováveis se intensificou. As primeiras avaliações tinham como foco o consumo de energia dos processos produtivos e em seguida, passaram a dar mais atenção aos aspectos ambientais, como as emissões (EEA, 1997).

A primeira metodologia desenvolvida, surgiu de um estudo custeado pela Coca-Cola em 1969, com o objetivo de comparar três diferentes tipos de embalagens de

refrigerante. Na ocasião, contrariando as expectativas da época, a garrafa de plástico apresentou melhores resultados ambientais que as de vidro (HUNT & FRANKLIN, 1996).

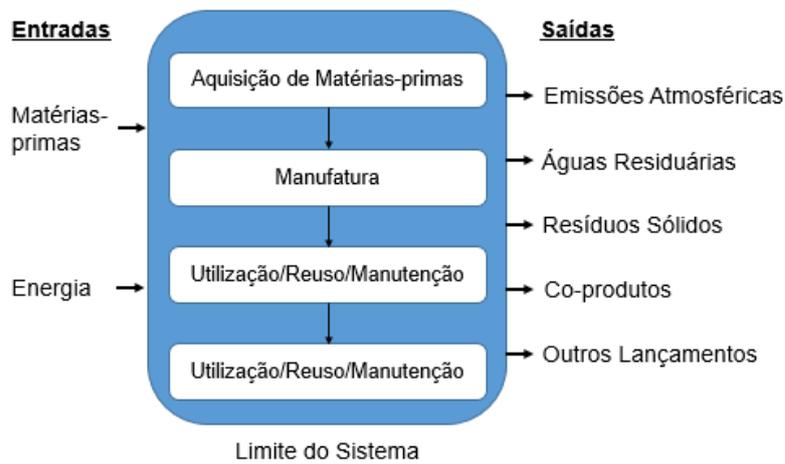
Nas décadas que se seguiram, pela quantidade de estudos que surgiram abordando avaliação de ciclo de vida, evidenciou-se a necessidade de criar uma metodologia única, padronizada que pudesse aumentar a confiabilidade dos estudos e que se pudesse comparar os resultados obtidos. Até então, muitos estudos se conduziram de maneira tendenciosa visando estratégias de marketing, que apresentavam ao público apenas resultados que eram interessantes para as empresas (CHEHEBE, 1998).

Na década de 1990, a ISO (*The International Organization of Standardization*), com a necessidade de normatização de uma metodologia para ACV, iniciou estudos para produzir a primeira série de normas no assunto. A série “ISO 14040 – *Environmental management – Life cycle assessment*” foi lançada em 1997, através da norma ISO 14040 que estabelece os princípios e a estrutura da normatização. Em seguida, três normas complementares foram desenvolvidas: a ISO 14041:1998, a ISO 14042:2000 e a ISO 14043: 000 que tinham por objetivo detalhar as etapas da ACV.

Em 2006, a ISO decidiu consolidar as três normas em um único documento, a ISO 14044:2006 – *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guideline*. Houve ainda, recentemente, mais algumas publicações da ISO que abordam temas mais específicos do assunto (SILVA, 2015).

### **2.5.1 Metodologia**

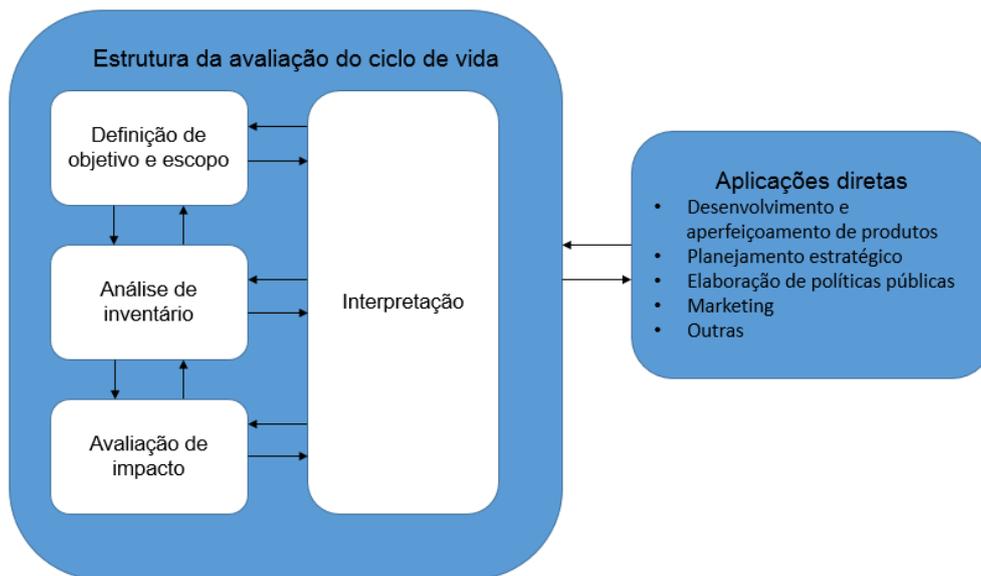
A avaliação do Ciclo de Vida de um produto, ou processo, é uma técnica que permite avaliar o desempenho ambiental e assim os potenciais impactos ao meio ambiente, ao longo de seu ciclo de vida. A compilação de dados é feita a partir de uma pesquisa detalhada de entradas, desde a aquisição de matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a destinação final (UNEP e SETAC, 2011). A Figura 5 expressa as entradas e saídas de um sistema ou produto.



**Figura 5:** Ciclo de Vida de um produto

**Fonte:** Adaptado de USEPA (2006)

Sendo assim, essa ferramenta é capaz de ajudar na identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de processos e produtos, e ainda auxilia na tomada de decisão e seleção de indicadores de desempenho ambiental mais relevantes. Além disso, os resultados obtidos no estudo da ACV podem ser transformados em marketing das empresas, por meio da rotulagem ambiental. A Figura 6 apresenta as fases da avaliação do ciclo de vida de um produto (ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009).



**Figura 6:** Estrutura da Avaliação do Ciclo de vida

**Fonte:** ABNT (2009)

Como é possível perceber com a Figura 6, um estudo de ACV é composto fundamentalmente por quatro fases interligadas entre si:

- Fase 1: Objetivo e escopo
- Fase 2: Análise de inventário
- Fase 3: Avaliação de impactos
- Fase 4: Interpretação

### **2.5.2 Objetivo e escopo**

Segundo a norma, na definição do objetivo, deve estar de maneira bem clara as razões de se realizar o estudo e a aplicação pretendida com o mesmo. Além disso, deve conter também o público-alvo a quem se destina o estudo e ainda se existe a pretensão de divulgar os resultados publicamente. De maneira geral, dois são os principais propósitos da realização da ACV: avaliar os impactos ambientais associados às etapas do ciclo de vida de um produto ou avaliar as consequências ambientais da adoção de processos ou produtos alternativos (PRÉ,2013).

Para a definição do escopo, é necessário determinar elementos como o sistema de produto, a funcionalidade do mesmo e as fronteiras do sistema que será abrangida. Da mesma maneira, deverá conter a unidade funcional adotada e o fluxo de referência, assim como a metodologia e as categorias de impacto.

A fronteira do sistema delimita quais etapas do ciclo de vida farão parte do estudo, de acordo com a conveniência. A fronteira de estudo mais utilizada é a “do berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*), que avalia todas as etapas do ciclo de vida, desde a obtenção das matérias-primas até seu fim de vida. A exclusão de estágios do ciclo de vida, processos, entradas e saídas só pode ser realizada se isso não ocasionar mudanças significativas no estudo. Para tal, deve ser registrado de forma clara as razões e implicações dessa omissão (PAULA, 2016).

Para que o estudo seja transparente e confiável, é importante que sejam definidas as fontes de dados, pressupostos adotados e suas limitações de forma que fique claro e tenha uma interpretação adequada por parte do público alvo (MARTINS, 2017).

### **2.5.3 Análise de inventário de Ciclo de Vida (ICV)**

A segunda fase da ACV envolve a compilação e quantificação de dados de entrada (matérias-primas e energia) e saídas (emissões atmosféricas, águas residuárias, resíduos sólidos, co-produtos etc) do sistema previamente estabelecido. É um processo iterativo uma vez que a coleta dos dados amplia o conhecimento sobre o sistema e novos requisitos e limitações são identificados, requerendo assim novos dados e/ou mudanças nos procedimentos de coleta objetivando satisfazer os requisitos do estudo (ABNT, 2009).

Os dados utilizados no estudo podem ser calculados, mensurados ou estimados. Além disso, podem ser de origem primária ou secundária, desde que todas as informações estejam claramente descritas, disponíveis e referenciadas para o público alvo, assim como os procedimentos de cálculos utilizados (MARTINS, 2017).

Os dados utilizados podem ser adquiridos por meio de fontes que estão disponíveis ao público, como literatura técnica e científica e base de dados, como o *Ecoinvent* e o *The U.S Life Cycle Inventory Database*. Um dos problemas enfrentados pelo uso de bancos de dados está associado à regionalidade e temporalidade. No Brasil, recentemente foi criado o SICV Brasil – Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida, que está sendo desenvolvido pelo Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACB) (CONMETRO, 2010).

### **2.5.4 Avaliação de Impacto**

A terceira fase da ACV, objetiva interpretar os dados obtidos na fase anterior de inventários e associá-los aos impactos ambientais potenciais do sistema, avaliando suas magnitudes e significâncias. A seleção de categoria de impacto, indicador de categoria e modelo de caracterização, classificação e caracterização dos impactos é são elementos obrigatórios para a AICV. Como elementos opcionais, estão a Normalização, Agrupamento e Ponderação (ISO, 2009).

As categorias de impacto e os modelos de caracterização que serão adotados no estudo, devem ser definidos no escopo. Essas categorias de impacto descrevem questões ambientais relevantes como mudanças climáticas, eutrofização, toxicidade humana, depleção de recursos, entre outros. Cada categoria é representada por um indicador de categoria (SILVA, 2015).

Segundo BAUMANN e TILLMAN (2004), na classificação é realizada uma associação dos dados do inventário com as características de impacto selecionadas para serem objeto de estudo. Pode acontecer que algumas emissões sejam vinculadas a mais de uma categoria de impacto, como por exemplo, os óxidos de nitrogênio que devem ser associados às categorias de eutrofização e acidificação

Já na caracterização, o impacto de cada emissão ou uso de recurso é modelado quantitativamente, ou seja, as emissões classificadas em uma categoria são ponderadas por meio de um fator (de classificação) ou fatores de equivalência, dependendo do modelo de caracterização que foi adotado (SILVA, 2015).

Facultativamente podem ser realizadas a normalização, agrupamento e ponderação. De acordo com a ISO 14.044, na normalização os resultados da caracterização são relacionados aos valores de referência de forma a expressar a magnitude relativa dos indicadores de impacto. Agrupamento é a formação de grupos de categorias de impacto ou a hierarquização de acordo com uma escolha de valores subjetivo as preferências de quem aplica a metodologia da ACV. A ponderação, assim como o agrupamento, é baseada em escolha de valores onde utiliza-se fatores numéricos para converter os resultados de indicadores de diferentes categorias de impacto de modo a obter a significância relativa de acordo com o objetivo do estudo (ISO, 2009; FINNVEDEN et al., 2009).

## **2.5.5 Interpretação dos Resultados**

A interpretação dos resultados obtidos é a última etapa. Nesta fase, analisam-se os resultados adquiridos do inventário e da avaliação de impacto de maneira a se obter

conclusões, limitações do estudo e fornecem-se recomendações para o público-alvo. Os resultados devem ser interpretados de acordo com as premissas do objetivo e escopo definidos (EUROPEAN COMISSION, 2010).

A falta de informação e a variabilidade dos dados podem gerar incertezas de diversos tipos, e em todas as fases da ACV. A fase de interpretação tem suma importância na análise de incertezas, ainda mais se o estudo tiver como objetivo a tomada de decisão (FINNVEDEN, 2009). Nessa etapa avaliam-se as incertezas dos dados, pressupostos e escolhas que se propagam nos cálculos e como essas afetam a confiabilidade dos resultados.

### **3. Material e métodos**

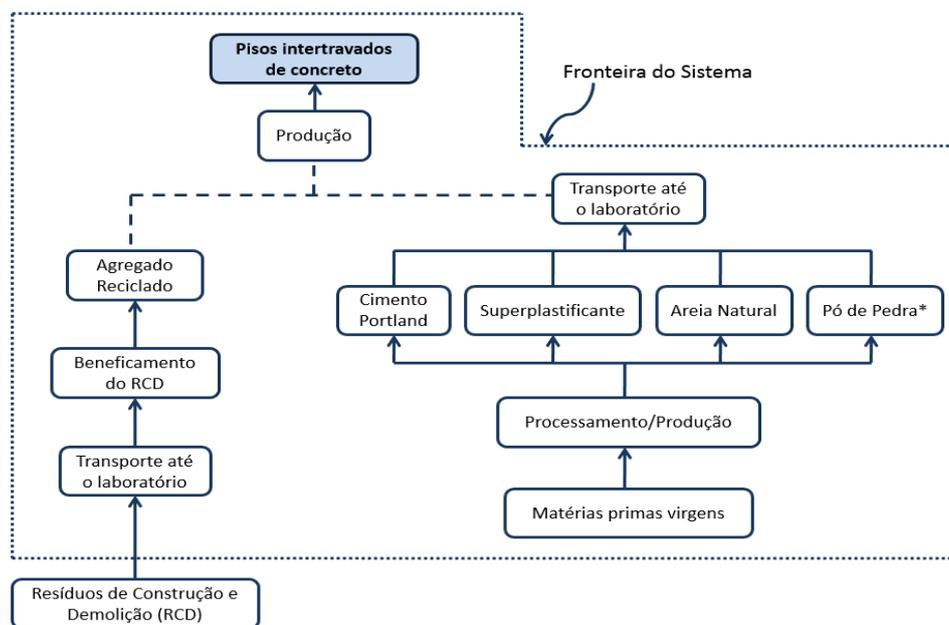
O presente capítulo é estruturado seguindo a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida estabelecida pela norma ISO 14040. Assim sendo, na definição do objetivo e escopo são apresentados os objetos de estudo e as fronteiras do sistema e a unidade funcional. Na etapa do Inventário do Ciclo de Vida, são detalhadas a origem dos constituintes dos concretos estudados e é apresentada a descrição de como foram produzidos. Já na etapa de Análise de Impacto, são apresentadas as duas metodologias de ACV empregadas: a ACV “manual” e a ACV utilizando o *Software SimaPro*. Por fim, são feitas as considerações e apresentados os dados utilizados na modelagem das ACVs.

#### **3.1 Definição do Objetivo e Escopo**

O presente estudo tem como objetivo principal aplicar duas metodologias de ACV para realização de uma avaliação comparativa do impacto ambiental de pisos intertravados de concretos usualmente empregados na construção civil com concretos produzidos com materiais alternativos, de forma a avaliar a viabilidade ambiental desses novos materiais. Portanto, este estudo visa também incentivar o uso da ACV para tal fim, tendo como público-alvo a comunidade acadêmica, empresas do setor de construção civil e demais interessados no tema.

Os sistemas de produto avaliados foram as produções de pisos intertravados de concreto no laboratório NUMATS localizado na UFRJ, e a fronteira de estudo adotada foi do berço ao portão. Foram considerados os processos de obtenção das principais matérias-primas (cimento, agregados naturais e superplastificantes), o beneficiamento do RCD para obtenção dos agregados reciclados de concreto e de cerâmica, o transporte dos mesmos até o laboratório e o processo de mistura dos materiais (Figura 7).

Vale salientar que apesar do pó de pedra ser considerado um agregado reciclado, como ele já é comumente empregado no ramo da construção civil, foi adquirido pronto para o uso, assim como os outros constituintes do concreto, à exceção dos agregados reciclados de RCD, beneficiados no próprio laboratório.



**Figura 7:** Fronteira do sistema em estudo

**Fonte:** Elaboração própria.

É importante destacar que, dadas as fronteiras do sistema dos produtos propostos, não foram avaliados os impactos associados com o uso dos concretos, reutilização ou descarte dos mesmos. Considerou-se até a produção dos mesmos, por isso, até o “portão da fábrica” que neste caso, foi o laboratório.

Na modelagem de ciclo de vida com o software *SimaPro* 8.0 optou-se pela metodologia de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) CML-IA, já que diversos estudos levantados na revisão bibliográfica utilizaram tal metodologia. Essa é uma metodologia com abordagem *midpoint* (orientada a problemas) da qual o *SimaPro* dispõe de duas versões: a versão *baseline*, com 10 categorias de impacto e uma versão estendida com categorias de impacto extras.

A versão empregada neste trabalho foi a *baseline* e a categoria de impacto escolhida para avaliação foi mudanças climáticas: relaciona-se às emissões de gases

de efeito estufa (GEE) para a atmosfera. A escolha de uma única categoria de impacto para análise decorre do objetivo de comparar os resultados obtidos pelas duas metodologias. Como a ACV “manual” somente trabalhou com emissão de CO<sub>2</sub>, essa escolha fez-se necessária.

A unidade funcional adotada neste trabalho foi 1m<sup>3</sup> de unidades de pavimento normalizada pela resistência a compressão do concreto, em MPa, após 28 dias de cura.

### 3.2 Inventário do Ciclo de Vida

Os concretos estudados neste trabalho foram produzidos durante um projeto de iniciação científica desenvolvido pela autora, em 2016. Para tanto, como agregados foram utilizados RCD proveniente da demolição de parte do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF), localizado na Cidade Universitária – Rio de Janeiro (Figura 8), argila esmagada obtida de unidades de alvenaria rejeitadas e pó de pedra obtida como rejeitos de britagem de rochas localmente disponíveis. Além destes, foram utilizados outros constituintes do concreto: cimento Portland CPV-ARI, produzido pela Holcim Brasil, areia natural localmente disponível (Rio Guandu), superplastificante Glenium 51 produzido pela BASF Brasil e água potável do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.



**Figura 8:** Resíduos da demolição de parte do Hospital Universitário

**Fonte:** Site do guia Oglobo<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Disponível em: < <https://oglobo.globo.com/rio/escombros-de-predio-implodido-no-hospital-da-ufrj-ainda-nao-foram-recolhidos-na-ilha-do-fundao-2801119>> Acesso em: 31 de out. de 2018

Todo o material foi levado ao laboratório NUMATS por meio de caminhão e os resíduos foram devidamente preparados e beneficiados (moagem e peneiramento). Serão descritos no inventário como se deram esses processos e a produção em si dos concretos.

A seguir, serão detalhados os materiais constituintes dos concretos estudados, bem como seus processos produtivos, bem como as distâncias de transporte de cada um deles.

### **Cimento Portland**

O Cimento Portland utilizado no presente trabalho foi o CPV-ARI produzido pela Holcim Brasil. Este tipo de cimento é caracterizado pela alta resistência inicial, que segundo a ABNT NBR 5733/91, tem a seguinte definição:

“Aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos. Ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos, em teor especificado na norma”.

De acordo com Silva (2015) no Brasil, o sistema rodoviário é o modal mais empregado para o transporte de cimento entre as cimenteiras e os consumidores, alcançando 96% do total de cimento transportado. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM 2009), as empresas produtoras transportam cimento, em média, a locais que distam até 300 km da fábrica, estendendo-se a 500 km no caso de regiões menos povoadas, no eixo sul-sudeste, e distâncias maiores que 1.000 km na região Norte. A distância considerada para o transporte de cimento até o laboratório foi de 300 km.

## **Agregados reciclados com RCD**

Para transformar os resíduos em agregados, os resíduos de construção e demolição foram levados ao laboratório, e lá foram separados conforme sua origem: os resíduos do HUCFF deram origem aos resíduos cinza e o beneficiamento de tijolos cerâmicos maciços deu origem aos agregados vermelhos. A seguir, serão descritos separadamente.

### **RCD cinza**

Os agregados reciclados cinzas, foram provenientes dos resíduos do HUCFF, isso é, os resíduos originários de concretos e argamassas. Para homogeneizar o material, espalhou-se o mesmo sobre uma lona plástica, em camadas homogêneas, formando pilhas. A seguir, subdividiu-se a pilha em sessões baseadas no tamanho das partículas.

Terminada a etapa de homogeneização do material, os resíduos de construção e demolição cinzas (RCDc) foram colocados em um britador de mandíbula móvel QUEIXADA 200 (Figura 9), com o objetivo de triturar o material. O britador separa os resíduos em duas frações de agregados: miúdos e graúdos. Neste trabalho, utilizou-se a fração de agregados miúdos.



**Figura 9:** Britador de mandíbulas móveis QUEIXADA 200 utilizado para triturar os RCD

**Fonte:** Acervo próprio

Após a britagem do material, homogeneizou-se mais uma vez através do procedimento de pilha e submeteu-se à secagem em estufa a  $100 \pm 5$  °C até atingir massa constante.

Para atingir a granulometria desejada para utilização como agregado, o material foi peneirado a seco. Conforme estabelecido pela ABNT NBR 7211, foram utilizados apenas os grãos passantes pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e retidos na peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m.

A distância do descarte de RCDc até o laboratório considerada foi 3,5 km.

### **RCD vermelho**

Os outros agregados reciclados estudados foram os vermelhos. Os mesmos foram produzidos a partir da britagem de tijolos cerâmicos maciços, no Laboratório de Materiais de Construção (LAMAC) da Escola Politécnica da UFRJ. Do mesmo modo que os RCDc, os resíduos de construção e demolição vermelhos (RCDv) foram submetidos ao processo de moagem através do britador de mandíbulas móvel QUEIXADA 200 (Figura 9), gerando também as seguintes frações de agregados: graúdo e miúdo.

O agregado foi peneirado na peneira com abertura de malha de 12,5 mm e o material retido foi novamente colocado no equipamento. Esse procedimento realizado repetidamente até a quantidade retida na peneira ser considerada desprezível. Em seguida, o material foi lavado e peneirado na peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m de modo a retirar o material pulverulento presente em quantidades significativas no RCDv.

Toda a energia elétrica utilizada pelo maquinário nesses processos foi quantificada e será utilizada nos cálculos para a quantificação dos impactos ambientais.

A distância do descarte de RCDv até o laboratório considerada foi 7,4 km.

## **Pó de Pedra**

O pó de pedra utilizado neste trabalho foi obtido como resíduo de britas localmente disponíveis. Este agregado foi obtido junto à Pedreira Vigné localizada no Município de Nova Iguaçu/RJ e distância considerada para o transporte do pó de pedra até o laboratório foi de 31,9 km.

## **Superplastificante**

O aditivo utilizado foi o superplastificante Glenium 51®, produzido pela BASF. Esse aditivo tem como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, reduzindo a quantidade de água necessária para a mistura e melhorando a trabalhabilidade sem alterar o tempo de pega (PAULA, 2016). A distância considerada para o transporte do superplastificante da fábrica em São Bernardo do Campo, SP, até o laboratório foi de 480 km.

## **Água**

A água utilizada no presente trabalho é proveniente do abastecimento de água da cidade do Rio de Janeiro, porém, consideramos o transporte como zero já que ela chega através das tubulações e é retirada da pia.

## **Produção dos concretos**

Foram produzidos e estudados 3 tipos de blocos de pavimento de concretos: o concreto de referência, o concreto cinza e o concreto vermelho:

1. **o concreto de referência** foi produzido com cimento Portland CPV-ARI areia natural, pó de pedra, água e superplastificante;
2. **o concreto cinza** possui cimento Portland CPV-ARI, RCDc (cinza) proveniente do beneficiamento de resíduos de concreto, areia natural, água e superplastificante;

3. o **concreto vermelho** possui cimento Portland CPV-ARI, RCDv (vermelho) proveniente do beneficiamento de argila esmagada obtida a partir de unidades de alvenaria de argila rejeitada, areia natural, água e superplastificante;

Uma vez adquiridos os materiais (ou produzidos conforme explicitado anteriormente), pôde-se produzir os blocos de pavimento. A produção foi realizada no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS) da COPPE/UFRJ.

Para fabricar os blocos de concreto seco, utilizou-se um misturador planetário (Figura 10) que tem velocidade de rotação de 167 rpm e capacidade de 20 litros. Primeiramente, o cimento e os agregados foram adicionados ao misturador e permaneceram 3 minutos de modo a garantir uma homogeneização dos materiais secos. Em seguida, a água e superplastificante foram acrescentados e misturados por mais 10 minutos.



**Figura 10:** Misturador Planetário utilizado para misturar os constituintes dos concretos

**Fonte:** Acervo próprio

A mistura foi, então, levada para a produção de fato dos blocos. Para tanto, foi utilizada uma vibroprensa da Saara Brasil com uma pressão de compactação de 130 psi e frequência de vibração de 10 ciclos por segundo.

A vibroprensa é equipada com moldes com capacidade para produzir 3 unidades de 20 x 10 x 6 cm ao mesmo tempo. Para facilitar a desmoldagem, os moldes foram cobertos com óleo antes do preenchimento com o concreto. O concreto foi então colocado sobre os moldes e vibrado a 130 psi por 30 segundos e, em seguida, desmoldado por um pistão pneumático. Foram produzidos 54 corpos-de-prova, que foram curados durante 28 dias em uma câmara úmida, que mantém a umidade relativa em cerca de 99%. A Figura 11 a seguir, exhibe os blocos logo após serem produzidos.



**Figura 11:** Blocos de pisos intertravados de concreto produzidos na vibroprensa

**Fonte:** Acervo próprio

## **Desempenho Mecânico**

A resistência à compressão é um dos parâmetros mais relevantes em projetos de engenharia. Não basta encontrar resultados que sejam satisfatórios do ponto de vista ambiental, se os blocos de concreto não apresentarem resultados adequados quanto às questões estruturais. Foi realizado um ensaio de Resistência à Compressão aos 28 dias. Para tanto, foi avaliado através da ruptura dos blocos na prensa servo controladora Shimadzy, modelo UH-F1000Kni. Foram ensaiados 3 corpos de prova de cada concreto estudado, totalizando 27 ensaios com corpos de prova saturados e capeados com pasta de enxofre. Após este procedimento, ocorreu o rompimento dos blocos na prensa, sendo adotada uma velocidade de carregamento de 0,1 mm/min.

### **3.3 Análise do Inventário do Ciclo de Vida**

Nesta sessão será apresentada a metodologia utilizada para a realização das duas ACV. A escolha da ACV “manual” se deu pelo fato dos bancos de dados utilizados pelos *Softwares* de avaliação do ciclo de vida contemplarem dados principalmente Europeus, que não necessariamente refletem a realidade brasileira. Os dados de entrada da ACV “manual” foram obtidos com o Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular (ACV-m) de Blocos e Pisos de Concreto, e portanto, retratam a realidade brasileira.

A modelagem de ACV realizada através do software *SimaPro* v.8.0, foi realizada utilizando-se o banco de dados *Ecoinvent* v.3, por se tratar de um dos mais completos e mais empregados banco de dados de ICV do mundo.

#### **3.3.1 ACV “Manual”**

A avaliação de ciclo de vida “manual”, foi desenvolvida durante o projeto de iniciação científica, em 2015, realizado pela autora e seu orientador. Para a realização desta ACV, foi feita em escala laboratorial a aplicação da ACV-m proposta pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS).

Essa metodologia fez parte de um estudo de performance da indústria de pré-moldados, em que se objetivou analisar o uso de matérias-primas, consumo água e de energia, emissão de CO<sub>2</sub> e geração de resíduos durante o processo de produção de unidade de pavimentos e alvenaria, utilizando uma ACV modular simplificada (CBCS, 2015). Serão apresentadas as equações utilizadas para os cálculos e sem seguida (Tabela 1 e 2) os valores adotados no presente trabalho.

### 3.3.1.1 Fator de emissão de CO<sub>2</sub> dos agregados reciclados

Como esta metodologia é manual, fez-se necessário encontrar o fator de emissão de CO<sub>2</sub> dos agregados reciclados. Para tanto, realizou-se uma soma das emissões provenientes do transporte dos resíduos do local em que foram descartados até o laboratório com as emissões associadas à energia elétrica utilizada para moer e peneirar os resíduos, dividiu-se esta soma pela massa dos mesmos, conforme a Eq.1.

$$FE_{AR} = \frac{(EF_C * C_C * M_R + FE_E * C_E)}{M_R} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

FE<sub>AR</sub>: Fator de emissão de agregados reciclados em kgCO<sub>2</sub>/ton;

EF<sub>C</sub>: Fator de emissão de combustível em kgCO<sub>2</sub>/l;

C<sub>C</sub>: Consumo de combustível no transporte do descarte até o laboratório em l/ton;

M<sub>R</sub>: Massa dos resíduos em ton;

FE<sub>E</sub>: Fator de emissão da eletricidade em kgCO<sub>2</sub>/kWh;

C<sub>E</sub>: Consumo de energia em kWh;

A emissão de CO<sub>2</sub> do transporte das matérias-primas foi calculada como um produto do fator de emissão do combustível utilizado no transporte, multiplicado pelo total de matéria-prima transportada e pelo consumo de combustível do transporte. A Eq. 2 demonstra o exposto.

$$CO2_{TMP} = EF_C * C_{MP} * C_C \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$CO_{2TMC}$ : Emissão de  $CO_2$  do transporte de matéria-prima em  $kgCO_2$ ;

$C_{MC}$ : Consumo de matérias-primas em ton.

O consumo de combustível utilizado no transporte das matérias-primas foi calculado como um produto da média de consumo dos veículos, multiplicado pelo número de viagens, total de massa transportada e a distância de transporte, dividido pelo consumo das matérias-primas. A Eq. 3 está representada.

$$C_C = \frac{C_{CV} * N * M_T * D_T}{C_{MP}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$C_{CV}$ : Média de consumo de combustível dos veículos em l/ton.km;

N: Número de viagens;

$M_T$ : Massa total transportada incluindo o veículo em ton;

$D_T$ : Distância de transporte em km.

### 3.3.1.2 Emissão total de $CO_2$ das unidades de pavimento

O total de emissão de  $CO_2$  foi calculado através da soma de três componentes: (i) a emissão de  $CO_2$  do transporte das matérias-primas de suas fontes até o laboratório, mais (ii) a emissão de  $CO_2$  oriundo da produção das matérias-primas, mais (iii) a emissão de  $CO_2$  da produção das unidades de pavimento. Conforme verificado na Eq. 4.

$$CO_{2Tot} = \sum_{i=1}^n (CO_{2PMP} + CO_{2TMP}) + CO_{2PUP} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$CO_{2TOT}$ : Total de emissão de  $CO_2$  em  $kgCO_2$ ;

$CO_{2PMP}$ : Emissão de  $CO_2$  da produção das matérias-primas em  $kgCO_2$ ;

$CO_{2TMP}$ : Emissão de  $CO_2$  do transporte das matérias-primas em  $kgCO_2$ ;

$CO_{2PUP}$ : Emissão de  $CO_2$  da produção das unidades de pavimento em  $kgCO_2$ .

A emissão de CO<sub>2</sub> oriunda da produção das matérias-primas foi calculada como um produto da média dos fatores de emissão de cada matéria-prima, multiplicado pela quantidade consumida. A Eq. 5 representa o cálculo.

$$CO2_{PMP} = \sum_{i=1}^n FE_{MP} * C_{MP} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

FE<sub>MP</sub>: Fator de emissão de 1 ton de cada matéria-prima em kgCO<sub>2</sub>/ton;

C<sub>MP</sub>: Consumo de cada matéria-prima para 1m<sup>3</sup> de unidade de pavimento em ton.

A emissão de CO<sub>2</sub> dos transportes das matérias-primas foi calculada como um produto do fator de emissão do combustível utilizado no transporte, multiplicado pela quantidade total de material transportada e pelo consumo de combustível do meio de transporte. Conforme a Eq. 6.

$$CO2_{TMP} = \sum_{i=1}^n FE_C * C_{MP} * C_c \quad (\text{Eq. 6})$$

O consumo de combustível do transporte das matérias-primas, foi calculado como um produto da média de consumo de combustível de veículos, multiplicado pelo número de viagens, o total de massa transportada, a distância de transporte e dividida pelo consumo de matéria-prima. A Eq. 7 representa o cálculo.

$$C_F = \sum_{i=1}^n \frac{c_{CV} * N * M_T * D_T}{C_{MC}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

C<sub>CV</sub>: Média do consumo de combustível dos veículos em l/ton.km;

N: Número de viagens;

M<sub>T</sub>: Massa total transportada incluindo o veículo em ton;

D<sub>T</sub>: Distância transportada em km.

A emissão de CO<sub>2</sub> da produção das unidades de pavimento foi calculada como um produto do consumo de energia dos equipamentos utilizados para produzir as

unidades de pavimento, multiplicado pelo fator de emissão do tipo de energia consumida. Segundo a Eq. 8.

$$CO2_{PUP} = FE_E * C_E \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

$FE_E$ : Fator de emissão de energia em  $kgCO_2/kWh$ ;

$C_E$ : Consumo de energia em kWh.

As tabelas a seguir, trazem os valores adotados como dados de entrada para o desenvolvimento da ACV “manual”. A distância de cada matéria-prima até o laboratório, está retratada na tabela 1.

**Tabela 1:** Distância do transporte das matérias-primas

Matéria-prima	Distância (km)
Cimento Portland	300,0
Areia Natural	65,9
Pó de Pedra	31,9
RCDv	7,4
RCDc	3,5
Superplastificante	480,0

**Fonte:** Elaboração própria

Os fatores de emissão associados às matérias-primas, à eletricidade e ao combustível utilizado no transporte, bem como a fonte utilizada, são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Fator de emissão utilizado na ACV “manual”

Insumos	Fator de Emissão ( $kgCO_2/unid$ )	Unidade	Fonte
Cimento Portland	670	ton	(Fairbairn, 2010)
Areia Natural	9,6	ton	(CBCS, 2015)
Superplastificante	690	ton	(EFCA, 2002)
Eletricidade	0,2767	kWh	(Fairbairn, 2010)
Diesel	3,3	l	(CBCS, 2015)

**Fonte:** Elaboração própria

Para os agregados, o fator de emissão do pó de pedra foi retirado de um recente estudo apresentado pelo CBCS. Não foram encontrados estudos representativos para o fator de emissão de RCD no cenário brasileiro, utilizou-se os valores calculados pela metodologia apresentada em 3.3.1.1.

O veículo utilizado no transporte do resíduo tem uma capacidade de carga de 17 ton, pesa 7 ton e consome 0,03 L/ton.km de óleo diesel. O moedor e a peneira tem uma potência total instalada de 3,58 kW, e a eficiência global do processo é 1,1 m<sup>3</sup>/h. O fator de emissão obtido para os agregados reciclados está apresentado na Tabela 3. O fator de emissão dos RCD encontrado foi menor do que o do pó de pedra, e os três agregados reciclados emitem muito menos CO<sub>2</sub> do que a areia natural.

**Tabela 3:** Fator de emissão dos agregados reciclados

Agregado	Fator de emissão dos agregados reciclados (kgCO <sub>2</sub> /ton)		
	Transporte (kgCO <sub>2</sub> /ton)	Reciclagem (kgCO <sub>2</sub> /ton)	Total (kgCO <sub>2</sub> /ton)
RCDv	1,03	0,50	1,53
RCDc	0,49	0,47	0,96
Pó de Pedra	-	-	1,9 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Média brasileira fornecida pelo CBCS (2015)

**Fonte:** Elaboração própria

### 3.3.2 ACV com *SimaPro*

Entre os softwares mais utilizados para a Análise do Ciclo de Vida está o *SimaPro*<sup>®</sup>, desenvolvido pela *Pré-Sustainability* com sede na Holanda. Esse programa permite que sejam modelados produtos e sistemas e avaliados os impactos do ciclo de vida de processos e produtos, a partir do inventário e de banco de dados que ele possui.

O *SimaPro* agrega sempre a versão mais atualizada do banco de dados *Ecoinvent*<sup>®</sup>, que abrange mais de 10 mil processos. Além de calcular os impactos

associados a cada sistema, o programa também permite realizar uma análise comparativa entre os mesmos, para verificar-se os mais impactantes (ESTEVEZ, 2016). Ressalta-se que embora o *Ecoinvent 3.0* seja um banco de dados renomado, seu desenvolvimento tem como base a realidade europeia. Entretanto, devido ao limitado acesso e disponibilidade de dados relativos à realidade brasileira, optou-se por ele.

Para o desenvolvimento da ACV com o *SimaPro*, foram seguidas as orientações propostas pela ISO 14.040 segundo as fases para a realização e alimentado o programa com os mesmos dados de entrada da outra metodologia.

### 3.3.2.1 Dados de entrada do *SimaPro*

Para a produção dos três tipos de concreto estudados no trabalho, foi utilizada uma quantidade fixa de Cimento Portland de 262,5 kg/m<sup>3</sup> e uma relação de água-cimento de 0,49. Fixou-se também a quantidade de superplastificante em 0,05 % para todas as misturas. Vale ressaltar que as quantidades de cada material foram determinadas por meio de um processo de dosagem que não faz parte do escopo do presente trabalho.

A Tabela 4 a seguir, apresenta as quantidades de materiais utilizadas em cada tipo de concreto estudado utilizadas como dados de entrada no *SimaPro*.

**Tabela 4:** Quantidade de materiais em cada concreto

Concretos	Água/ Cimento	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasti- ficante (%)	Areia Natural (kg/m <sup>3</sup> )	Pó de Pedra (kg/m <sup>3</sup> )	RCDv (kg/m <sup>3</sup> )	RCDc (kg/m <sup>3</sup> )
Areia Natural + Pó de Pedra	0,49	262,5	0,05	1208,8	650,9	-	-
Areia Natural + RCDv				1101,1	-	592,9	-
Areia Natural + RCDc				1293,2	-	-	431,1

**Fonte:** Elaboração própria

Nota-se que a quantidade de areia natural no concreto com RCD cinza acaba sendo maior até mesmo que a utilizada no concreto de referência. Tal fato se deu pelas

especificações granulométricas da ABNT NBR 7211. Se utilizássemos menos areia no concreto cinza, este ficaria fora as especificações da norma, e como os concretos estudados tinham uma aplicabilidade de uso, na ciclovia, optou-se por utilizar mais areia e ficar dentro da norma.

A Tabela 5, apresenta os dados dos processos produtivos dos materiais que constituem o concreto de referência estudado.

**Tabela 5:** Dados de Entrada dos materiais no *SimaPro* para o concreto de referência

Material	Quantidade para 1m <sup>3</sup> de concreto	Unidade	Processo no <i>SimaPro</i>
Cimento Portland	262,5	kg	Cement, Portland {RoW}  production  Cut-off, S
Areia Natural	1208,8	Kg	Sand {RoW}  gravel and quarry operation  Cut-off, S
Superplastificante	1,31	Kg	Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde {GLO}  production  Cut-off, S
Pó de Pedra	650,9	kg	Stone meal {RoW}  production  Cut-off, S
Água	128,6	Kg	Tap water {RoW}  Market for  Cut-off, S
Transporte	179,8	tkm	Transport, freihjt, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3  Cut-off, S
Energia	101,39	kWh	Electricity, médium voltage {BR}  electricity voltage transformation from high to médium voltage  Cut-off, S

**Fonte:** Elaboração própria

Para a quantificação do transporte, o *SimaPro* utiliza a unidade tkm. Para chegar até essa unidade, calculou-se para o transporte de cada matéria-prima (apresentado na Tabela 2), multiplicando a quantidade transportada em tonelada pelos quilômetros percorridos pelos caminhões.

Para a energia, foi determinada a quantidade de energia elétrica utilizada pela vibroprensa para a produção dos blocos e convertido o valor correspondente para a produção de 1m<sup>3</sup> dos mesmos.

Para os agregados reciclados RCDc e RCDv, foi desenvolvido um processo a parte, uma vez que estes materiais não se encontram na base de dados do *SimaPro*.

A Tabela 6, apresenta os dados dos processos produtivos dos materiais que constituem o concreto com RCDc estudado.

**Tabela 6:** Dados de Entrada dos materiais no *SimaPro* para o concreto com RCDc

Material	Quantidade para 1m <sup>3</sup> de concreto	Unidade	Processo no <i>SimaPro</i>
Cimento Portland	262,5	kg	Cement, Portland {RoW} production Cut-off, S
Areia Natural	1293,2	Kg	Sand {RoW} gravel and quarry operation Cut-off, S
Superplastificante	1,31	Kg	Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde {GLO} production Cut-off, S
RCDc	431,1	kg	Desenvolvido*
Água	128,6	Kg	Tap water {RoW} Market for Cut-off, S
Transporte	164,6	tkm	Transport, freihjt, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, S
Energia	101,39	kWh	Electricity, médium voltage {BR} electricity voltage transformation from high to médium voltage Cut-off, S

Fonte: Elaboração própria

Por fim, é apresentada na Tabela 7, os dados dos processos produtivos dos materiais que constituem o concreto com RCDv estudado.

**Tabela 7:** Dados de Entrada dos materiais no *SimaPro* para o concreto com RCDv

Material	Quantidade para 1m <sup>3</sup> de concreto	Unidade	Processo no <i>SimaPro</i>
Cimento Portland	262,5	kg	Cement, Portland {RoW} production Cut-off, S
Areia Natural	1101,1	Kg	Sand {RoW} gravel and quarry operation Cut-off, S
Superplastificante	1,31	Kg	Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde {GLO} production Cut-off, S
RCDv	592,9	kg	Desenvolvido*
Água	128,6	Kg	Tap water {RoW} Market for Cut-off, S
Transporte	157,2	tkm	Transport, freihjt, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, S
Energia	101,39	kWh	Electricity, médium voltage {BR} electricity voltage transformation from high to médium voltage Cut-off, S

Fonte: Elaboração própria

\*Para os RCD cinza e vermelho, não havia processo no *SimaPro*. Como tratam-se de resíduos, considerou-se as energias gastas em seus processos de beneficiamento.

## 4. Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da ACV realizada de acordo com os pressupostos estabelecidos no escopo do presente trabalho, descritos no capítulo de metodologia. Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia de ACV “manual”, em seguida aqueles obtidos através do uso do *SimaPro*.

### 4.1 ACV “manual”

A emissão total de CO<sub>2</sub> das unidades de pavimento tem três componentes: (i) transporte das matérias-primas, produção das matérias-primas (MP) e produção das unidades de pavimento.

Todos os componentes foram calculados utilizando os dados apresentados nas Tabelas 1 à 3. Os detalhes do procedimento de cálculo foram apresentados na seção 3.3.1.2. A configuração composta pelo misturador planetário (Figura 10) e pela vibroprensa (Figura 11) utilizada na produção das unidades, teve uma capacidade instalada total de 3.35 kW e consumo de energia de 1.46 kWh para 12 unidades de pavimento. A emissão devido à produção dos blocos de concreto foi de aproximadamente 28 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> para os três concretos estudados.

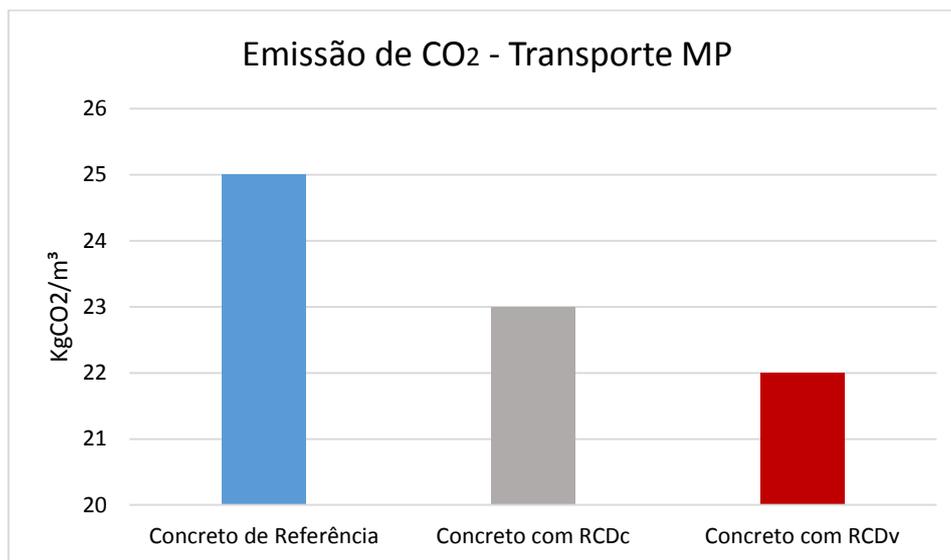
As parcelas de emissões devido ao transporte e à produção das matérias-primas (MP) contabilizadas estão apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8:** Resultados das emissões de transporte e produção de MP pelo ACV “manual”

Mistura	Transporte (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Produção MP (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Concreto de Referência	25	189
Concreto com RCDc	23	189
Concreto com RCDv	22	187

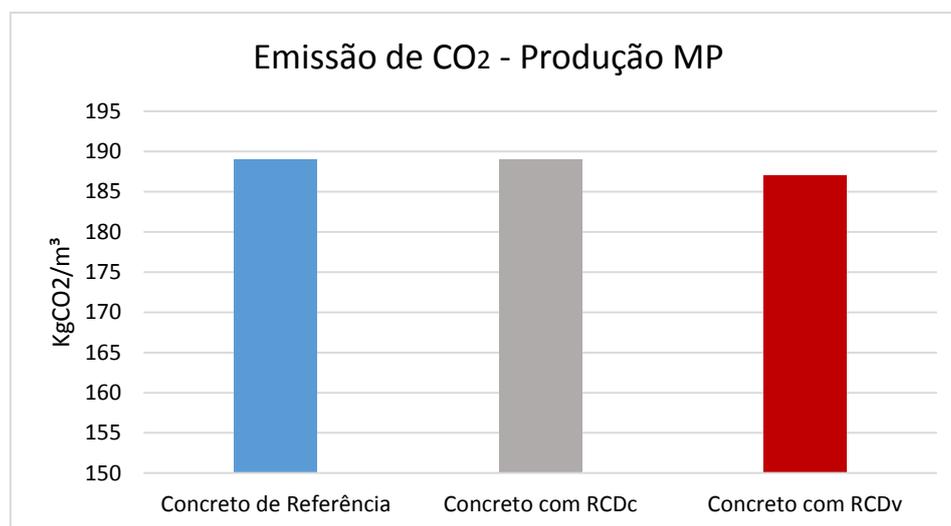
Fonte: Elaboração própria

Para melhor visualização dos resultados, foram gerados gráficos para emissões de CO<sub>2</sub> devido ao transporte (Figura 12) e à produção das matérias-primas (Figura 13). A emissão proveniente da produção dos blocos é a mesma, pois foram confeccionados no mesmo local e com os mesmos equipamentos, não havendo necessidade de representar graficamente.



**Figura 12:** Emissão devido ao transporte das matérias-primas – ACV “manual”

**Fonte:** Elaboração própria



**Figura 13:** Emissão devido à produção das matérias-primas – ACV “manual”

**Fonte:** Elaboração própria

Apesar o resíduo de construção e demolição cinza estar mais perto do laboratório (3,5 km) em comparação com o resíduo vermelho (7,4 km), a maior emissão de CO<sub>2</sub>

encontrada para o concreto com resíduo cinza em comparação ao vermelho, tanto no transporte quanto na produção das matérias-primas, pode ser explicada pela maior quantidade de areia natural utilizada no concreto cinza, justificado anteriormente para adequação das especificações granulométricas da ABNT NBR 7211.

A maior emissão atrelada ao concreto de referência, é explicada não só pela maior quantidade de material total utilizado para a confecção do mesmo, quanto pelo fato do pó de pedra encontrar-se significativamente mais longe do que os resíduos (quase 10 vezes mais longe do que o RCD cinza, por exemplo).

A Tabela 9 traz os resultados obtidos com a metodologia de ACV “manual” para emissão total dos três concretos estudados, assim como os resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão em 28 dia. Para chegar à unidade funcional adotada no trabalho, dividiu-se um pelo outro, obtendo um valor em  $\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ . Dessa forma, o resultado obtido pela divisão revela o potencial impacto ambiental a ser gerado para o desenvolvimento de 1 MPa de resistência à compressão em  $1\text{m}^3$  de concreto. Assim, é possível analisar os concretos, não somente em termos de composição material, como também de eficiência estrutural (DAMINELI et al., 2010).

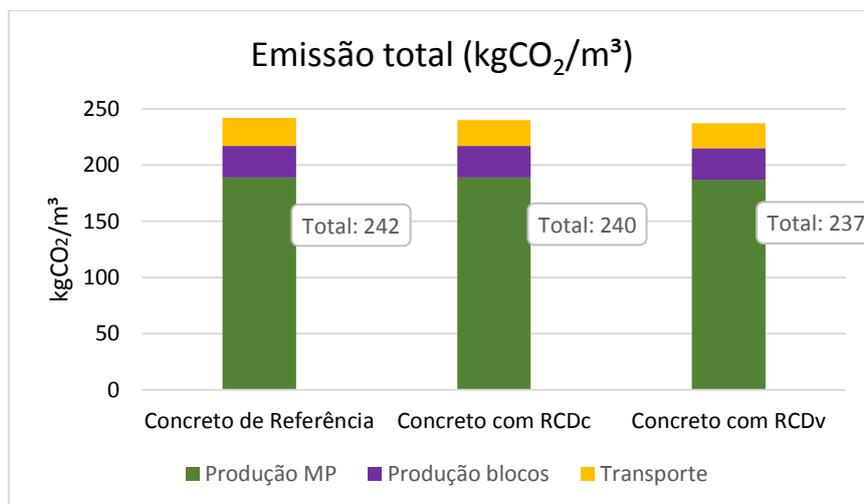
**Tabela 9:** Resultados ACV “manual”

Mistura	Emissão total de $\text{CO}_2$ ( $\text{KgCO}_2/\text{m}^3$ )	Resistência à compressão (MPa)	$\text{KgCO}_2/\text{m}^3.\text{Mpa}$
Concreto de Referência	242	22	11
Concreto com RCDc	240	25	10
Concreto com RCDv	237	20	12

**Fonte:** Elaboração própria

O total de emissão de  $\text{CO}_2$  obtido para cada tipo de unidade de pavimento está apresentado na Figura 14. Pode-se perceber que as três misturas apresentaram no geral, aproximadamente a mesma emissão de  $\text{CO}_2$  (em média  $240 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ) com uma variação menor que 3%. Segundo estudo recente da CBCS (2015), a faixa média brasileira de emissão de  $\text{CO}_2$  para unidades de pavimento de  $6 \times 10 \times 20 \text{ cm}$  é de 150 à

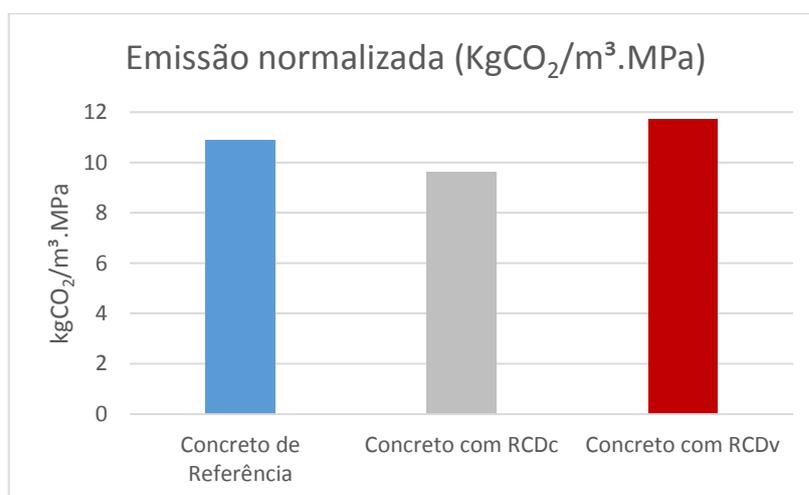
400 kg/m<sup>3</sup>. Os valores obtidos para os três agregados reciclados estão próximos da extremidade inferior deste intervalo.



**Figura 14:** Emissão total dos blocos de concreto – ACV “manual”

**Fonte:** Elaboração própria

O resultado total de emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de concreto por MPa está apresentado na Figura 15. Pode-se perceber que, devido às pequenas diferenças obtidas de resistência à compressão, para a categoria escolhida para análise, emissões de CO<sub>2</sub>, não se justificaria a substituição parcial da areia natural. Inclusive, para o concreto com RCD vermelho, os resultados obtidos chegaram a ser piores do que o concreto de referência usualmente utilizado na indústria.



**Figura 15:** Emissão total dos blocos de concreto por MPa – ACV “manual”

**Fonte:** Elaboração própria

## 4.2 *SimaPro*

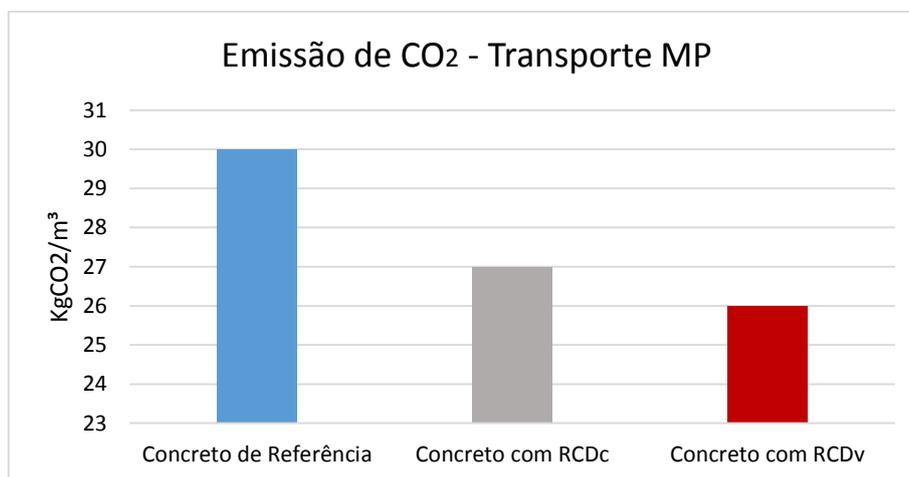
Os resultados obtidos pela metodologia de ACV utilizando o *Software SimaPro* versão 8.0 e a base de dados *Ecoinvent 3*, são apresentados na Tabela 10. Da mesma maneira que a outra metodologia, optou-se por destrinchar as etapas para verificar qual tem maior influência na computação total de emissão de CO<sub>2</sub> dos blocos de concreto estudados. A emissão devido à produção dos blocos de concreto foi de aproximadamente 18 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> para os três concretos estudados.

**Tabela 10:** Resultados das emissões de cada parcela pelo ACV com *SimaPro*

Mistura	Transporte (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Produção MP (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Concreto de Referência	30	282
Concreto com RCDc	27	241
Concreto com RCDv	26	241

**Fonte:** Elaboração própria

Para melhor visualização dos resultados, foram gerados gráficos para emissões de CO<sub>2</sub> devido ao transporte (Figura 16) e à produção das matérias-primas (Figura 17).

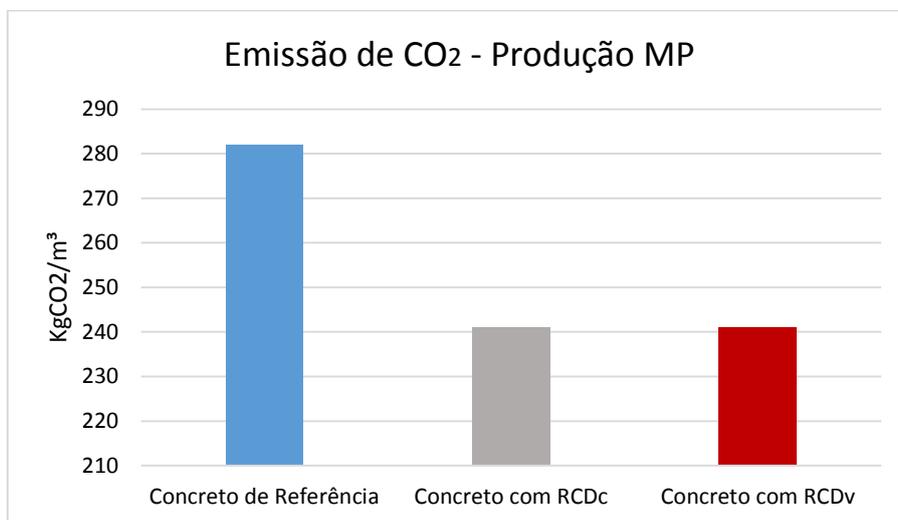


**Figura 16:** Emissão devido ao transporte das matérias-primas – ACV *SimaPro*

**Fonte:** Elaboração própria

O transporte das matérias-primas utilizadas para a produção dos concretos, foi obtido multiplicando-se a quantidade de material pelos km percorridos (tkm). Para o concreto de referência, utilizou-se maior quantidade de material total, que quando

multiplicado pelos mesmos km percorridos, obteve-se um número maior: 179,8 tkm, justificando a maior emissão encontrada, seguido do concreto cinza e o de menor emissão o concreto vermelho.



**Figura 17:** Emissão devido à produção das matérias-primas – ACV *SimaPro*

**Fonte:** Elaboração própria

A emissão associada à produção das matérias-primas, como esperado, foi menor para os concretos cinza e vermelho, quando comparado ao de referência. A diferença de emissão do concreto cinza e do vermelho no consoante à produção de matérias-primas foi tão pequena que pode se considerar a mesma emissão para ambos.

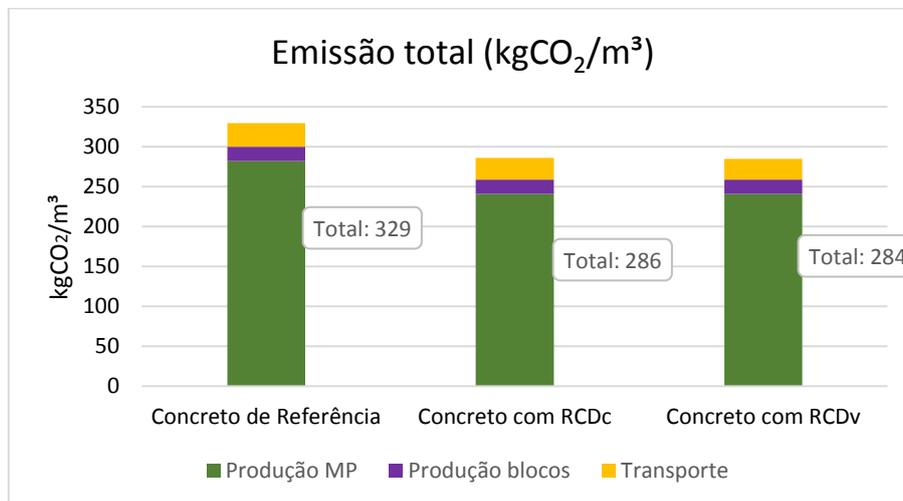
A Tabela 11 traz os resultados obtidos com a metodologia de ACV *SimaPro* para emissão total dos três concretos estudados, assim como os resultados obtidos com os ensaios de resistência à compressão em 28 dia. A importância desta normalização foi explicitada anteriormente.

**Tabela 11:** Resultados ACV *SimaPro*

Mistura	Emissão total de CO <sub>2</sub> (KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)	KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> .Mpa
Concreto de Referência	329	22	15
Concreto com RCDc	286	25	11
Concreto com RCDv	284	20	14

**Fonte:** Elaboração própria

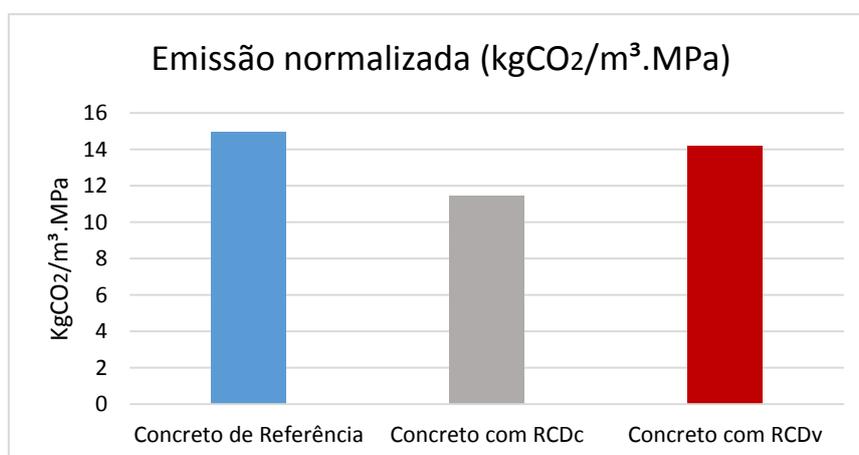
O total de emissão de CO<sub>2</sub> obtido para cada tipo de unidade de pavimento está apresentado na Figura 18. Nota-se que a maior emissão total de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> foi a do concreto de referência, seguido do concreto com RCD cinza e, muito próximo a este, o concreto com RCD vermelho.



**Figura 18:** Emissão total dos blocos de concreto – ACV *SimaPro*

**Fonte:** Elaboração própria

O resultado total de emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de concreto por MPa está apresentado na Figura 19. Pode-se perceber que, mais uma vez, assim como observado na metodologia de ACV “manual”, para a categoria de impacto analisada, devido às pequenas diferenças obtidas de resistência à compressão, não se justificaria a substituição parcial da areia natural.



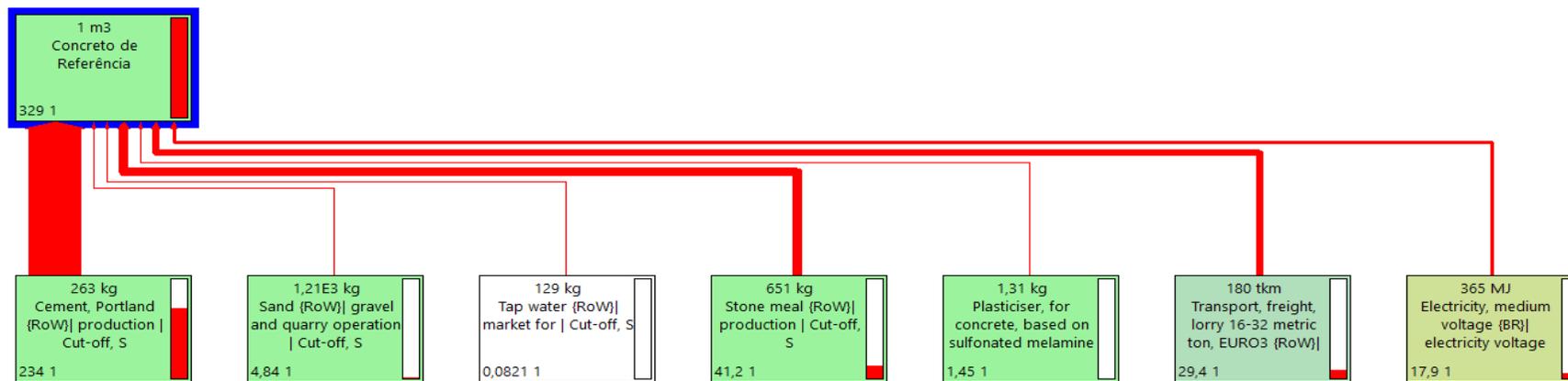
**Figura 19:** Emissão total dos blocos de concreto por MPa – ACV *SimaPro*

**Fonte:** Elaboração própria

As Figura 20, 21 e 22 exemplificam, através de diagramas de processos, a modelagem realizada para os três tipos de concretos avaliados no presente trabalho. Os diagramas foram obtidos no próprio *Software*, sendo este recurso disponível no *SimaPro* 8.0, chamado Rede.

Na rede, as grossuras das linhas representam a importância na contribuição do processo. Notoriamente, o que mais contribui para a emissão do concreto é o Cimento Portland para todos os produtos analisados. Este fato está relacionado a grande emissão de CO<sub>2</sub> do seu processo, principalmente consoante a produção do clínquer.

No caso do concreto de referência (Figura 20), o segundo maior impacto está associado ao pó de pedra, em seguida o transporte e a eletricidade, enquanto que nos concretos com os resíduos cinza (Figura 21) e vermelho (Figura 22), o segundo maior impacto é o transporte, seguido da eletricidade.



**Figura 20:** Diagrama de processos da produção de 1 m³ de concreto de referência – ACV *SimaPro*

Fonte: *SimaPro* 8

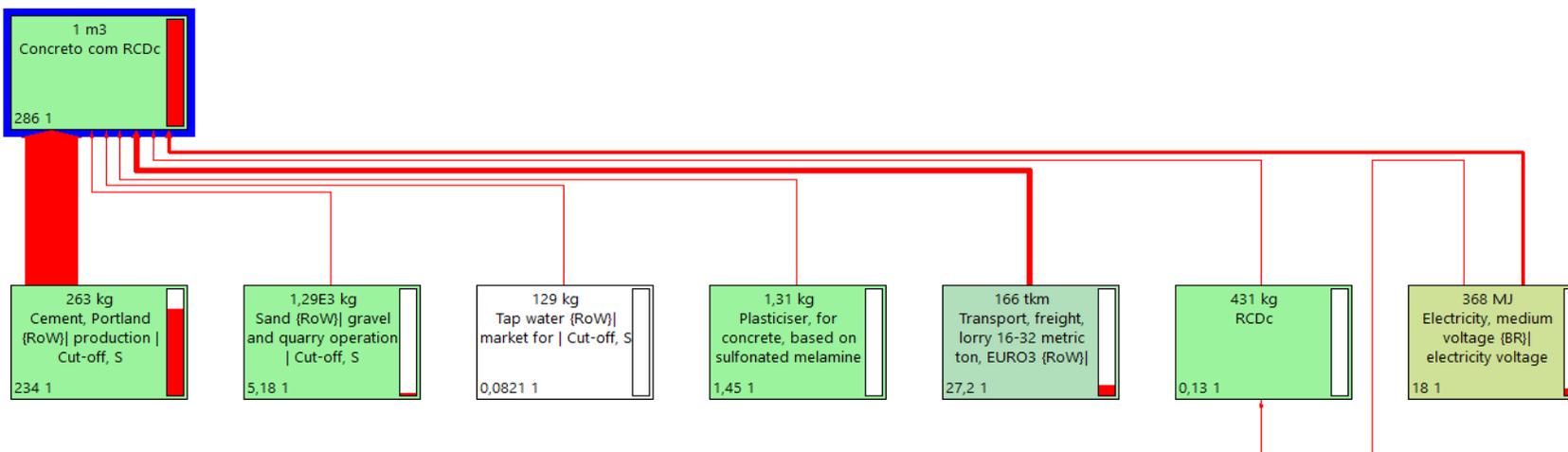


Figura 21: Diagrama de processos da produção de 1 m³ de concreto cinza – ACV *SimaPro*

Fonte: *SimaPro 8*

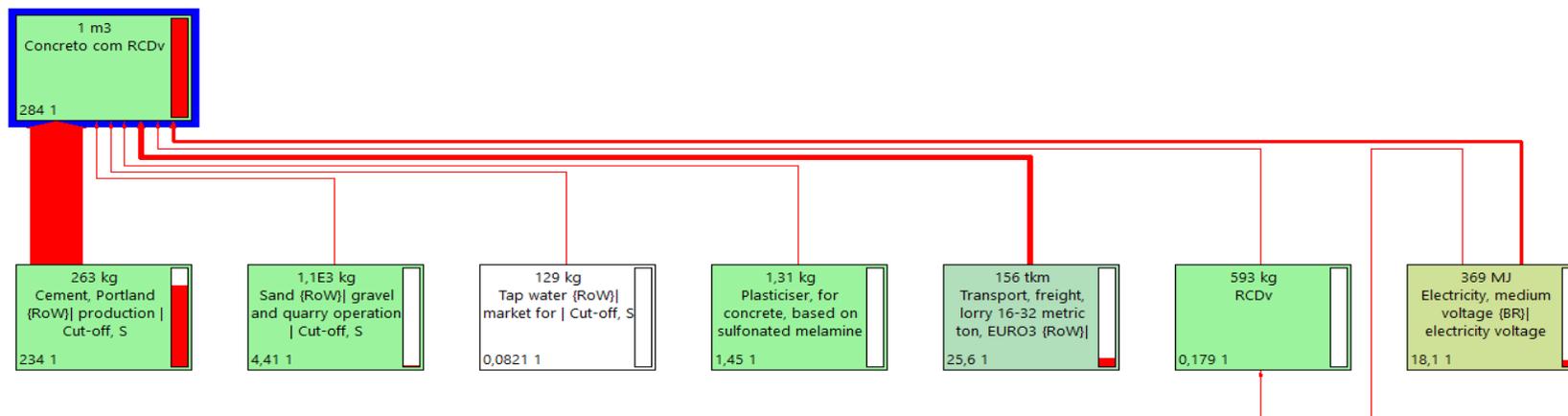


Figura 22: Diagrama de processos da produção de 1 m³ de concreto vermelho – ACV *SimaPro*

Fonte: *SimaPro 8*

## 5. Conclusão

As duas metodologias de avaliação do ciclo de vida utilizadas no trabalho se mostraram adequadas para avaliar os concretos estudados. A utilização de uma unidade funcional de desempenho, que leva em consideração parâmetros de resistência permitiu que a análise fosse mais fiel para a interpretação das vantagens e desvantagens do emprego de diferentes materiais.

Ao comparar as duas metodologias, os resultados encontrados, apesar de seguirem a mesma ordem de emissão (em primeiro lugar concreto de referência, seguido do concreto cinza e por último o concreto vermelho), foram diferentes. A metodologia de ACV “manual” apresentou valores de emissões totais menores que os da ACV com *SimaPro*.

A emissão devido à produção das matérias-primas foi o que mais contribuiu nesta diferença entre as metodologias. Tal fato pode ser explicado pela diferença na base de dados utilizada nas metodologias: enquanto que na ACV “manual” utilizou-se dados coletados na indústria brasileira, com realidade local, na ACV com *SimaPro* os dados foram provenientes do *Ecoinvent*, banco de dados mundial.

Como explicitado ao longo do trabalho, foi necessário utilizar mais areia natural do que o previsto na produção dos concretos cinzas, para se adequarem às especificações granulométricas da ABNT NBR 7211. Esta adequação acaba prejudicando em parte a análise pretendida, já que se visava utilizar menos areia natural.

Quando analisados os resultados normalizados para a resistência à compressão, as duas metodologias mostraram que, devido às pequenas diferenças obtidas no desempenho mecânico, os três concretos não diferem muito entre si.

É importante ressaltar que o uso dos resíduos para a produção dos concretos, acarreta em uma destinação adequada para os resíduos, evitando alguns impactos negativos como assoreamento de rios, obstrução de sistemas de drenagem, obstrução de ruas e outros. Além disso, impactos positivos podem ser gerados, como a melhoria da saúde da população que vive no entorno de despejos inadequados e a valorização do local que antes tenha sido abrigo de resíduos.

Por fim, destaca-se que para as duas metodologias empregadas, os resultados encontrados mostraram que os concretos com RCD cinza e vermelho emitiram menos CO<sub>2</sub> que o concreto de referência, com pó de pedra. Como as três composições tinham a mesma quantidade de cimento, de fato, a emissão pode ser analisada diretamente para os agregados das misturas.

## 6. Recomendações

A primeira recomendação, é que seria relevante continuar o estudo destes concretos para outras categorias de impacto, que justificassem ainda mais a sua empregabilidade.

Além disso, seria importante expandir o sistema de produto incluindo as etapas de uso e descarte, “berço ao túmulo”, para se avaliar o sistema completo dos concretos.

Como estudo para a justificativa e incentivo da produção desses novos materiais, seria interessante realizar uma análise econômica. Se verificado que a utilização de resíduos da construção representa economias financeiras na produção dos blocos, possivelmente estas substituições ganhariam força no mercado.

As aplicações das metodologias apresentadas podem ser estendidas para outros tipos de concretos produzidos com materiais alternativos, como cinzas agroindustriais, lodo de estação de tratamento de esgoto e biomassa, por exemplo.

## Referências

ABNT NBR 5733:1991. **Cimento Portland de alta resistência inicial** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1991.

ABNT NBR 12.655:2006. **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR 7211:2005. **Agregados para concreto – Especificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR ISO 14040:2009. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR ISO 14044:2009. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para a economia de baixo carbono**: caderno 3: nota técnica cimento. São Paulo, 2012.

AMARIO, M; **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC)** 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a construção civil. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br>>. Acesso em: 19/12/2018.

AZEVEDO, F.F; MARTINS, R.H.B.; PARANAIBA, N.S.C.T.; OLIVO, J.S. AGREGADOS MIÚDOS: A importância dos Agregados Miúdos no Controle Tecnológico do Concreto. **R. Conexão Eletrônica**, Três Lagoas, MS. v. 14, n. 1, p. 2079-2086, 2017.

BAUMANN, H., TILLMAN, A-M. **The hitch hikers´ s guide to LCA: na orientation in life cycle assessment methodology and application**. 1 ed. Studentlitteratur, 2004.

CHEHEBE, J.R. **Análise de ciclo de vida de produtos – ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 1998.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução nº 307** de 5 de julho de 2002.

CONMETRO, 2010. Resolução no 03, de 22 de abril de 2010. **Dispõe sobre a Aprovação do Termo de Referência do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências.**

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) (2015). **Sustentabilidade na indústria de blocos e pavimento de concreto – Avaliação de Ciclo de Vida Modular.** Disponível em: <<http://www.blocobrasil.com.br/projetos/cbcs-ciclo-de-vida-modular>> Acesso em: 13/08/2018.

CORDEIRO, G.C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

DAMINELLI, B.L., KEMEID, F.M, AGUIAR, P.S, JONH, V.M. “Measuring the eco-efficiency of cement use”. **Cemente and Concrete Composites** v.32, n.8, pp. 555-562, 2010.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral, **Economia Mineral do Brasil 2009.** 764 p.

EEA. **Life Cycle Assessment – a guide to approaches, experiences and information sources.** 1997. Disponível em <<https://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C>>. Acesso em: 25/10/2018.

EFCA. **EFCA Environmental Declaration – Superplasticising admixtures.** 2006. Disponível em: <<http://www.efca.info/efca-publications/environmental/>>. Acesso em: 30/10/2018.

ESTEVES, E.M.M.; **Análise do ciclo de vida do biodiesel de soja: o impacto do sistema de integração lavoura pecuária (SLIP).** 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

EUROPEAN COMMISSION. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance.** First edition March 2010. Traduzido por Luiz Marcos Vasconcelos. Luxembourg. Publications Office of the European Union, 317 pp, 2010.

European Federation of Concrete Admixture Associations (EFCA) (2002). **EFCA Environmental declaration Superplasticizing admistures.** Junho 2002. Disponível em:<<http://www.admixtures.org.uk/downloads/xIS%20Environmental%20Declaration%20Superplasticizer.PDF>> Acesso em: 13/09/2018.

FAIRBAIRN, E.M.R.; AMERICANO, B.B.; CORDEIRO, G.C.; PAULA, T.P.; TOLEDO, R.D.; SILVOSO, M.M. (2010) **Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potential for carbon credits**. Journal of environmental management (91): 1864-71. 2010.

FERREIRA, A.R.L.; MOREIRA, H.C. **Análise Crítica da Gestão de Resíduos de Construção Civil: Estudo de caso do Município do Rio de Janeiro**. 2013. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FINNVEDEN, G., HAUSHCHILD, M.Z., EKVALL, T. "**Recent Developments In Life Cycle Assessment**". Journal of Environmental Management, v.91, n.1 (Ago), pp. 1-21. 2009.

HUNT, R.; FRANKLIN, W. (1996), **LCA – How it Came About: Personal Reflections on the Original and th Development of LCA in the USA**, International Journal for LCA, ECOMED Publichers, Landsberg.

IBRAM – Intituto Brasileiro de Mineração. Informações e análises da economia mineral brasileira. Brasília: IBRAM, 2010. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001157.pdf>.> Acesso em: 23 out. 2018.

KHATIB, J.M. **Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate**. Cement and Concrete Research; volume 35, pages 763-769, 2005.

LEITE, M.B.. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 290 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

LICETTI, J.C.; SERAFIM, D. **Análise do desempenho de três tipos de cimento no concreto de pós-reativos**. 2012. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LUZ, A.B.; ALMEIDA, S.L.M. **Manual de agregados para construção civil**, 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 411 p.

MALHOTRA, V. M. Making Concrete "Greener" With Fly-Ash. **Concrete International**, v. 21, n. 5, p. 61-66, 1999.

MALTA, SILVA e GONÇALVES: **Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. Gesta, v. 1, n. 2, p. 176-188, 2013 – ISSN: 2317-563X.

MAURY, M.B; BLUMENSCHHEIN, R.N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n. 1, p.75-96, jun. 2012.

MARTINS, I.D. **Avaliação do ciclo de vida do sistema bus rapid transit (BRT): um estudo de caso da transcarioca**. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MENOSSEI, R.T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 110 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, São Paulo, 2004.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON, tradução da 3ª edição em inglês, v.a: III, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

NETO, G.T.B. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento portland**. 149 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006

OLIVEIRA, L.S. **Avaliação do ciclo de vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: alvenaria e pavimentação**. 154 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PAULA, R.R. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) de argamassas e concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD)**. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PEDROZO, R.F.E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PETEK GURSEL, A.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A. "Life-Cycle inventory analysis of concrete productio: A critical review". **Cement and Concrete Composites** v.51, pp. 38-48, 2014.

PRÉ. Introduction to LCA with SimaPro. 2013. Disponível em: < <https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>> Acesso em: 01/08/2018

POON, C.S.; CHAN, D. **The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong.** Resources, Conservation and Recycling; article in press, 2006.

QUÉRÉ, C.L. et al. **Global carbono budge 2013.** Earth Syst. Sci. Data, 2014. n. 6, p. 235 – 263.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação.** 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SABNIS, G.M. **Green building with concrete: Sustainable design and construction.** 1 ed. CRC Press, 2011.

SCRIVENER, K.L.; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, *on line*, v. 38, p. 128-136, 2008.

SEALEY, B.J.; PHILLIPS, P.S.; HILL, G.J. **Waste Management Issues for th UK Ready-Mixed Concrete Industry.** Resources, Conservation and Recycling, vol. 31, p. 321-331. (2001)

SILVA, L.C.; **Avaliação de ciclo de vida de concretos com substituição parcial de cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz.** 132 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Coppe, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SNIC. **Relatório anual 2013.** Rio de Janeiro: Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento, 2014.

STAUDT, C.A. Caracterização de agregados graúdos disponíveis na região extremo oeste de Santa Catarina, utilizados na dosagem de concreto. **Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc São Miguel do Oeste**, São Miguel do Oeste, v. 3, n. 2525, p.1-11, out. 2016.

TOLEDO FILHO, R.D., GONÇASLVEZ, J.P., AMERCANO, B.B., FAIRBAIRN, E.M.R.; **Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil.** Cement and Concrete Research (37): 1357-1365. June 2007.

UNEP; SETAC. **Global guidance principles for Life Cycle Assessment databases.** 2011. Disponível em: < <http://www.unep.org/pdf/Global-Guidance-Principlesfor-LCA.pdf>>. Acesso em: 30/07/2018

USEPA (United States Environmental Protection Agency) 2006. **US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice.** EPA/600/R-06/060. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.EXE?ZyActionL=>>>. Acesso em: 31/07/2018.

WBCSD. **The Cement Sustainability Initiative: Recycling concrete.** 2009. Disponível em: < <https://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/sustainability-with-concrete/concrete-recycling> >. Acesso em 24/07/2018.