

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Cristiane Carine dos Santos

**CONCRETOS COM MISTURAS DE AGREGADO RESIDUAL DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E POZOLANA, COM  
ÊNFASE NA CARBONATAÇÃO**

Santa Maria, RS  
2017



**Cristiane Carine dos Santos**

**CONCRETOS COM MISTURAS DE AGREGADO RESIDUAL DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E POZOLANA, COM  
ÊNFASE NA CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), na área de concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM - RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia

Santa Maria, RS  
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Cristiane Carine dos  
CONCRETOS COM MISTURAS DE AGREGADO RESIDUAL DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E POZOLANA, COM ÊNFASE NA  
CARBONATAÇÃO / Cristiane Carine dos Santos.- 2017.  
218 p.; 30 cm

Orientador: Geraldo Cechella Isaia  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2017

1. Sustentabilidade 2. Impactos ambientais 3. Resíduos  
de construção e demolição 4. Durabilidade I. Isaia,  
Geraldo Cechella II. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Cristiane Carine dos Santos. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: cristianecdossantos@hotmail.com

**Cristiane Carine dos Santos**

**CONCRETOS COM MISTURAS DE AGREGADO RESIDUAL DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E POZOLANA, COM  
ÊNFASE NA CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), na área de concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM - RS), como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovado em 12 de dezembro de 2017:**

---

**Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**André Lübeck, Dr. (UFSM)**

---

**Ana Carolina Badalotti Passuello, Dr<sup>a</sup>. (UFRGS)**

Santa Maria, RS  
2017



## DEDICATÓRIA

*Ao meu noivo Gustavo Isac, meus pais Marilei e Neri, e ao meu irmão Marciano, por todo o apoio, compreensão e motivação.*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS, por sempre ter me iluminado e abençoado, me concedendo incontáveis oportunidades para que eu chegasse até aqui.

Ao meu noivo Gustavo Isac, que me acompanhou em todas as etapas deste trabalho, transmitindo força e coragem, motivação e paciência, se fazendo presente até mesmo nas etapas práticas da pesquisa.

Aos meus pais, Marilei e Neri, e ao meu irmão Marciano, por sempre me apoiarem e ajudarem em minhas decisões, e por terem me incentivado a continuar com os estudos.

Agradeço ao meu excelente professor orientador Geraldo Cechella Isaia, por todos os ensinamentos e orientações, pela incansável disponibilidade e motivação para a realização deste trabalho.

A todos os membros do grupo GEPECON pelos conhecimentos compartilhados.

Aos bolsistas do grupo GEPECON e funcionários do LMCC pelo auxílio prestado durante os trabalhos práticos em laboratório.

Aos professores membros da banca examinadora, André Lübeck, Ana Carolina Badalotti Passuello e Tatiana Cureau Cervo, por aceitarem o convite e pelas contribuições ao trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

Enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

*MUITO OBRIGADA!!!*



## RESUMO

### CONCRETOS COM MISTURAS DE AGREGADO RESIDUAL DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E POZOLANA, COM ÊNFASE NA CARBONATAÇÃO

AUTORA: Cristiane Carine dos Santos  
ORIENTADOR: Geraldo Cechella Isaia

Entre os inúmeros impactos ambientais causados pelos diversos segmentos da economia, a construção civil destaca-se por ser um dos setores que mais consome recursos naturais e gera emissões para o meio ambiente, incentivando pesquisadores a realizarem estudos para encontrar maneiras de minimizar esses impactos. Diante disso, a presente pesquisa objetiva estudar diferentes alternativas de pilar, compostos por dois tipos de cimento (CP IV e CP V-ARI), pozolana (cinza de casca de arroz) e resíduos de construção e demolição (RCD), para possibilitar a determinação dos principais impactos ambientais gerados por cada um deles e definir qual será a melhor alternativa avaliando-se ambientalmente e economicamente. Definidas as proporções das misturas de cada pilar, realizaram-se os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade longitudinal e durabilidade (carbonatação acelerada). Em que a resistência dos pilares com substituições de agregados graúdos naturais pelo RCD diminuiu bastante, mas com a utilização de pozolana teve-se uma compensação desta queda. Processo semelhante foi presenciado com o ensaio de módulo de elasticidade. Em relação à durabilidade, os maiores coeficientes de carbonatação foram obtidos pelos pilares em que utilizou-se cimento CPIV, tendo um aumento conforme o acréscimo de substituição do agregado natural pelo RCD. Já os pilares com o CPV-ARI, 15 e 30% de RCD não apresentaram carbonatação em nenhuma das idades analisadas, que pode ser explicado pela influência da baixa relação água/materiais cimentícios para esses dois traços, pois o dimensionamento deu-se em igualdade de resistências. Quanto a Avaliação do Ciclo de Vida, com abordagem do “berço ao túmulo”, os pilares com o cimento CPIV não foram favoráveis com as substituições de agregados graúdos naturais pelo RCD, já os compostos pelo CPV-ARI obtiveram melhores resultados comparando-se com os impactos gerados pelo pilar referência (sem substituições). Ao realizar a integração sustentabilidade x custo, obteve-se como melhor alternativa o pilar com 15% de RCD e cimento CPV-ARI.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade. Impactos ambientais. Resíduos de construção e demolição. Durabilidade.



## ABSTRACT

### CONCRETES WITH MIXTURES OF RESIDUAL AGGREGATE CONSTRUCTION AND DEMOLITION (RCD) AND POZOLANA, WITH EMPHASIZATION IN CARBONATION

AUTHOR: Cristiane Carine dos Santos  
COUNTRY DIRECTOR: Geraldo Cechella Isaia

Among the numerous environmental impacts caused by the various segments of the economy, civil construction stands out as one of the sectors that consumes the most natural resources and generates emissions to the environment, encouraging researchers to carry out studies to find ways to minimize these impacts. Therefore, the present research aims to study different pillar alternatives, composed of two types of cement (CP IV and CP V-ARI), pozolana (rice husk ash) and construction and demolition residues (RCD), to enable determination of the main environmental impacts generated by each one of them and to define what will be the best alternative being evaluated environmentally and economically. The proportions of the mixtures of each pillar were defined, tests of resistance to axial compression, modulus of longitudinal elasticity and durability (accelerated carbonation) were carried out. In that the resistance of the pillars with substitutions of natural aggregates by the RCD decreased considerably, but with the use of pozolana a compensation of this fall was obtained. A similar process was observed with the modulus of elasticity test. In relation to the durability, the higher carbonation coefficients were obtained by the pillars in which CPIV cement was used, with an increase according to the increase of the substitution of the natural aggregate by the RCD. However, the pillars with CPV-ARI and 15% and 30% RCD did not present carbonation in any of the analyzed ages, which can be explained by the influence of the low water / cementitious materials ratio for these two traits, since the dimensioning occurred in equality of resistance. Regarding the Life Cycle Assessment, with a "cradle to grave" approach, the pillars with the CPIV cement were not favorable with replacements of natural aggregates by the RCD, whereas the compounds by the CPV-ARI obtained better results when compared to the impacts generated by the reference pillar (without substitutions). When performing the sustainability integration x cost, the pillar with 15% RCD and CPV-ARI cement was obtained as the best alternative.

**Key words:** Sustainability. Environmental impacts. Construction and demolition wastes. Durability.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2. 1 - Emissões antropogênicas de CO <sub>2</sub> globais.....	30
Figura 2. 2 - Aumento das concentrações de CO <sub>2</sub> na atmosfera .....	31
Figura 2. 3 - Porcentagens da produção total por produto cultivado no Brasil .....	35
Figura 2. 4 - Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da CCA com diferentes tempos de moagem .....	36
Figura 2. 5 - CCV relacionando o custo de aquisição e de manutenção e reparo .....	45
Figura 2. 6 – Fluxograma simplificado das etapas do CCV .....	46
Figura 3. 1 - RCD totais coletados nas diferentes regiões do Brasil (toneladas/ano) .....	50
Figura 3. 2 - Esquemática do processo de carbonatação.....	65
Figura 3. 3 - Reações no poro do concreto .....	66
Figura 3. 4 - Carbonatação em argamassas expostas a diferentes concentrações de CO <sub>2</sub> .....	70
Figura 3. 5a – Poros totalmente secos .....	71
Figura 3. 6 – Cimento convencional e com adições - carbonatação.....	73
Figura 3. 7- Profundidade de carbonatação e relação a/mc .....	74
Figura 4. 1 - Etapas dos procedimentos para a realização do estudo .....	77
Figura 4. 2 - Sistema que engloba a unidade funcional em estudo – PILAR .....	79
Figura 4. 3 - Curva granulométrica dos materiais cimentícios.....	84
Figura 4. 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo .....	85
Figura 4. 5 – Curva granulométrica do agregado graúdo .....	86
Figura 4. 6 – Curva granulométrica do RCD.....	86
Figura 4. 7 - Curva de Abrams .....	90
Figura 4. 8 - Retificação dos corpos de prova .....	92
Figura 4. 9 - Ruptura dos corpos de prova .....	93
Figura 4. 10 - Extensômetro fixado ao corpo de prova .....	94
Figura 4. 11 - Selagem dos corpos de prova .....	95
Figura 4. 12 - Pesagem da fatia que não foi moída .....	96
Figura 4. 13 - Fatia na estufa a 105 °C .....	96
Figura 4. 14 - Amostra moída.....	97
Figura 4. 15 - Amostra na câmara para atingir o equilíbrio de umidade.....	97
Figura 4. 16 - Amostra moída colocada na estufa para obter o peso seco .....	98
Figura 4. 17 - Impermeabilização das amostras e distribuição da umidade.....	100
Figura 4.18 - Aspersão de fenolftaleína nas amostras para medição da profundidade carbonatada.....	101
Figura 4. 19 - Ilustração da página do software SimaPro.....	103
Figura 5. 1 - Resistência à Compressão Axial.....	111
Figura 5. 2 - Módulo de elasticidade do concreto .....	113
Figura 5. 3 - Profundidades de carbonatação .....	116
Figura 5. 4 - Custo unitário de cada alternativa de pilar.....	119
Figura 5. 5 - Três categorias de impactos por pilar .....	122
Figura 5. 6 - Mudanças climáticas.....	125
Figura 5. 7 - Consumo de recursos naturais .....	126
Figura 5. 8 – Consumo de energia elétrica .....	127
Figura 5. 9 - Geração de Resíduos.....	128
Figura 5. 10 - Consumo de água.....	129

Figura 5. 11 - Impactos individuais unitários ..... 132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Divergências entre CCV e ACV .....	46
Tabela 3. 1 - Composição do RCD de algumas cidades do Brasil.....	53
Tabela 3. 2 - Diferentes concentração de CO <sub>2</sub> .....	69
Tabela 4. 1 - Esforços solicitantes e definições de projeto.....	80
Tabela 4. 2 - Consumo de materiais e dimensionamento do pilar.....	81
Tabela 4. 3 - Características físicas dos materiais cimentícios.....	82
Tabela 4. 4 - Composição química dos materiais cimentícios .....	83
Tabela 4. 5 - Caracterização física dos agregados.....	85
Tabela 4. 6 - Classificação dos RCD em porcentagem .....	87
Tabela 4. 7 - Característica do aditivo redutor de água .....	87
Tabela 4. 8 - Misturas de concreto para o traçado da curva de Abrams.....	89
Tabela 4. 9 - Denominação e composição de cada um dos traços definitivos .....	90
Tabela 4. 10 - Definição dos traços de concreto a partir da curva de Abrams .....	91
Tabela 4. 11 - Quantidade de materiais por m <sup>3</sup> de concreto .....	91
Tabela 4. 12 - Quantidade de clínquer. m <sup>-3</sup> .....	107
Tabela 4. 13 - Fatores utilizados para a quantificação do CO <sub>2eq</sub> .....	109
Tabela 5. 1 - Profundidade média de carbonatação acelerada.....	115
Tabela 5. 2 - Equações das médias de profundidade de carbonatação .....	117
Tabela 5. 3 - Vida útil de cada um dos pilares com cobrimento efetivo de 20mm .....	11717
Tabela 5. 4 - Composição dos custos .....	11818
Tabela 5. 5 - ANOVA da influência dos fatores sobre a resistência à compressão axial...	12020
Tabela 5. 6 - ANOVA da influência dos fatores sobre o coeficiente de carbonatação (Kc) .....	12021
Tabela 5. 7 - Impactos totais, unitários, índices e custos .....	12323
Tabela 5. 8 - Gás carbônico equivalente (CO <sub>2eq</sub> ) .....	13030
Tabela 5. 9 - Impactos individuais unitários e índices .....	13131
Tabela 5. 10 - Média geométrica dos índices de impactos e custos .....	13434
Tabela 5. 11- ANOVA da influência dos fatores sobre a média geométrica dos índices de impactos e custo .....	13636



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	21
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
1.1 JUSTIFICATIVA .....	23
1.2 OBJETIVOS .....	25
<b>1.2.1 Objetivo geral</b> .....	25
<b>1.2.1 Objetivos específicos</b> .....	25
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	25
<b>CAPÍTULO II</b> .....	27
<b>2 SUSTENTABILIDADE</b> .....	27
2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	27
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS .....	29
<b>2.2.1 Mudanças climáticas e a influência da indústria da construção civil</b> .....	29
<b>2.2.2 Produção de concreto e o consumo de recursos naturais</b> .....	32
<b>2.2.3 Substituição de recursos naturais por materiais alternativos</b> .....	33
<i>2.2.3.1 Cinza de casca de arroz (CCA)</i> .....	34
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	37
<b>2.3.1 Objetivo e Escopo</b> .....	38
<b>2.3.2 Inventário do Ciclo de Vida</b> .....	39
<b>2.3.3 Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida</b> .....	40
<b>2.3.4 Interpretação do Ciclo de Vida</b> .....	42
<b>2.3.5 Análise do Ciclo de Vida relacionado à Construção Civil</b> .....	42
2.4 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA .....	45
<b>CAPÍTULO III</b> .....	49
<b>3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)</b> .....	49
3.1 COMPOSIÇÃO DOS RCD .....	51
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RESULTANTES DE RCD.....	53
3.3 UTILIZAÇÃO DE RCD EM CONCRETOS.....	56
<b>3.3.1 Características do concreto com RCD em estado fresco</b> .....	56
<b>3.3.2 Características do concreto com RCD em estado endurecido</b> .....	57
3.4 DURABILIDADE DE CONCRETOS COM RCD.....	62
<b>3.4.1 Carbonatação</b> .....	64
<i>3.4.1.2 Carbonatação em concreto com RCD</i> .....	67
<i>3.4.1.3 Mecanismos que influenciam a carbonatação em concretos com RCD</i> .....	68
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	77
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	77
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	78
<b>4.1.2 Variáveis independentes</b> .....	78
<b>4.1.3 Variáveis intervenientes</b> .....	78
<b>4.1.4 Variáveis dependentes</b> .....	78
4.2 OBJETIVO E ESCOPO .....	79
<b>4.2.1 Unidade funcional</b> .....	80

<b>4.2.2</b>	<b>Caracterização dos materiais utilizados.....</b>	<b>81</b>
4.2.2.1	<i>Materiais cimentícios .....</i>	81
4.2.2.2	<i>Agregados.....</i>	84
4.2.2.3	<i>Aditivo químico redutor de água.....</i>	87
<b>4.2.3</b>	<b>Dosagem do Concreto .....</b>	<b>87</b>
4.3	ENSAIOS REALIZADOS .....	91
<b>4.3.1</b>	<b>Ensaio de resistência à compressão axial .....</b>	<b>92</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Ensaio de Módulo de Elasticidade .....</b>	<b>93</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Ensaio de durabilidade do concreto .....</b>	<b>94</b>
4.3.2.1	<i>Pré – condicionamento.....</i>	95
4.3.2.2	<i>Carbonatação acelerada.....</i>	100
<b>4.3.4</b>	<b>Análise estatística .....</b>	<b>102</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Impactos ambientais e custos .....</b>	<b>102</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Software SimaPro.....</b>	<b>103</b>
<b>4.3.7</b>	<b>Vida útil - unidade funcional.....</b>	<b>104</b>
4.4	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	105
<b>4.4.1</b>	<b>Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida.....</b>	<b>108</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Interpretação do Ciclo de Vida.....</b>	<b>108</b>
<b>CAPITULO V.....</b>		<b>111</b>
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>111</b>
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	111
5.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL.....	113
5.3	CARBONATAÇÃO ACELERADA .....	114
5.4	ANÁLISE DOS CUSTOS .....	118
5.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	120
5.6	ANÁLISE DO CICLO DE VIDA .....	121
<b>5.6.1</b>	<b>Impactos totais: do berço ao túmulo .....</b>	<b>121</b>
<b>5.6.2</b>	<b>Impactos individuais.....</b>	<b>124</b>
5.6.2.1	<i>Mudanças climáticas.....</i>	125
5.6.2.2	<i>Consumo de recursos naturais.....</i>	125
5.6.2.3	<i>Consumo de energia elétrica .....</i>	126
5.6.2.4	<i>Geração de resíduos .....</i>	127
5.6.2.5	<i>Consumo de água.....</i>	128
5.6.2.6	<i>Pegada de carbono .....</i>	129
<b>5.6.3</b>	<b>Análise unitária dos impactos individuais .....</b>	<b>130</b>
5.7	ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS SUSTENTÁVEL X ECONÔMICO....	133
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>137</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>141</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>		<b>134</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>		<b>137</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>		<b>137</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>		<b>137</b>



## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento do consumo dos recursos naturais em nível mundial, geram-se grandes preocupações em relação ao meio ambiente, principalmente à poluição do ar e da água, contaminação do solo, escassez de recursos não renováveis e mudanças climáticas, tornando a sustentabilidade um assunto em destaque quanto à qualidade de vida e a sobrevivência dos seres vivos.

Um dos grandes desafios para a indústria da construção civil é encontrar equilíbrio entre as edificações e obras de infraestrutura, e ao mesmo tempo desenvolver produtos sustentáveis durante todo o seu ciclo de vida. Desta forma, o ambiente construído tem grande importância nas atividades humanas, revelando o quanto a indústria da construção está interligada com o desenvolvimento sustentável, já que a maior parte do tempo as pessoas passam dentro de edifícios, seja em locais de trabalho ou moradia.

A partir do Relatório *Brundtland* elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no ano de 1987, definiu-se o desenvolvimento sustentável como a maneira que as gerações atuais conseguem satisfazer suas necessidades, sem comprometer que as futuras gerações também consigam satisfazer suas próprias necessidades (UNEP; SETAC, 2007), o que despertou preocupações com a escassez dos recursos naturais e a busca por maiores conhecimentos sobre esta realidade.

Um marco da história que impulsionou fortemente os impactos prejudiciais ao meio ambiente foi caracterizado pela Revolução Industrial no século XVIII, em que se buscou favorecer a qualidade de vida humana, refletindo no meio ambiente, mais especificamente na relação homem x natureza. A partir deste acontecimento a construção civil também alavancou principalmente com a descoberta do cimento Portland, contribuindo ainda mais para a exploração de recursos naturais e emissão de poluentes.

Com o intuito de reduzir os impactos causados ao meio ambiente devido às atividades humanas, grande parte dos segmentos da sociedade tem buscado repensar suas estratégias de produção, principalmente o setor da construção civil que é um dos maiores consumidores de recursos naturais e geradores de resíduos. Relacionado a este contexto surgiram a algum tempo inúmeras pesquisas objetivando substituir recursos naturais por materiais alternativos, entre eles a reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados pela própria

construção civil, bem como o uso de resíduos agroindustriais, como cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana, cinza volante, entre outros materiais. Pois com a aplicação destes estudos haveria a possibilidade de prolongar por um maior período de tempo o ciclo de vida dos recursos naturais que são utilizados em grande quantidade pela construção civil.

Na busca por sustentabilidade, engloba-se a questão da reciclagem, que consiste no reaproveitamento e reutilização de materiais, dando uma nova finalidade para um resíduo que seria depositado no meio ambiente e ficaria poluindo por um grande período de tempo até a sua decomposição. Em relação à construção civil, a reciclagem e o reuso de materiais são ótimas alternativas para a preservação dos recursos naturais e, conseqüentemente, lançamento de menores quantidades de poluentes ao meio ambiente. Desta forma, o reaproveitamento de resíduos gerados pelo setor da construção civil torna-se cada vez mais importante.

Existem diversos estudos que confirmam a viabilidade técnica de substituir-se agregados naturais por materiais reciclados, sendo que grande parte desses estudos estão voltados à resistência dos novos materiais, confirmando a possibilidade de utilizar agregados reciclados na composição de argamassas e concretos.

Ao considerar a poluição ambiental e a evolução da construção civil, um fator importante a ser levado em conta é o consumo de concreto, classificado como o segundo material industrializado mais consumido no mundo, perdendo apenas pela água. Sendo este o principal material que pode potencializar o princípio da sustentabilidade, pois pequenas reduções no consumo dos seus constituintes, principalmente do cimento, apontam para ganhos consideráveis no consumo de energia, melhoria dos ecossistemas e prospecção de recursos naturais.

Com o aumento da produção de concreto, conseqüentemente aumenta-se o consumo de cimento Portland, que é um dos seus principais materiais constituintes e que mais polui o meio ambiente, sendo a indústria cimenteira considerada pelo Portal Odm-Fiep (2012) o setor responsável por cerca de 5% das emissões de CO<sub>2</sub> lançadas na atmosfera. Entretanto, conforme o Sindicato Nacional da indústria do Cimento (SNIC) pode-se considerar que mais de 50% das emissões de CO<sub>2</sub> pela indústria de cimento deve-se aos processos de produção, ocorrendo durante a transformação físico-química do calcário em clínquer, que é o principal constituinte do cimento. Dessa forma, as altas emissões geradas pelo clínquer ocorrem devido à participação do calcário em sua produção, já que parte dele se transforma em CO<sub>2</sub>.

Esses dados servem como incentivo a pesquisas por outros meios de produção de concreto que não poluam de maneira tão agressiva o meio ambiente. Uma das alternativas são

as adições minerais, que nos últimos anos são testadas com o objetivo de diminuir os danos ambientais e melhorar as propriedades do concreto, e até mesmo os custos de produção.

Dentro deste contexto, a presente pesquisa visa por meio de estudos e metodologias já desenvolvidas, avaliar a sustentabilidade do concreto estrutural, no que diz respeito à Análise do Ciclo de Vida (ACV) e Custo do Ciclo de Vida (CCV), com auxílio do *software SimaPro*.

O conceito de Ciclo de Vida é fundamental para o desenvolvimento sustentável, incluindo na fabricação dos produtos os impactos ambientais, sociais e econômicos ao longo do seu ciclo de vida. Entre os seus objetivos está a redução da utilização de recursos naturais e emissões de poluentes ao meio ambiente (UNEP; SETAC, 2007).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) relaciona-se a caracterização das entradas e saídas, aspectos e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto, ou seja, desde a aquisição da matéria-prima até a produção, uso, manutenção, reciclagem e disposição final, termo denominado “do berço ao túmulo” (UNEP; SETAC, 2009).

A presente pesquisa abrange a vida útil completa do concreto estrutural, ou seja, “do berço ao túmulo” (até o final da vida útil), sendo adotado como unidade funcional um pilar de concreto armado de uma edificação fictícia (unidade funcional é definida pela Norma ISO 14040 (2014) como sendo uma unidade de referência). A unidade funcional será analisada por meio de dois tipos de cimento, substituição parcial do cimento por um tipo de pozolana e substituição parcial do agregado graúdo por resíduos de construção e demolição (RCD), resistência à compressão axial, módulo de elasticidade longitudinal e, para vida útil a durabilidade frente à carbonatação até a despassivação da armadura.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O setor da construção civil é responsável pelo grande consumo de recursos naturais e energia, além da enorme produção de resíduos. Atualmente vem discutindo-se e procurando alcançar o desenvolvimento sustentável para tentar diminuir as emissões de gases que poluem o meio ambiente e que provocam o efeito estufa, sendo a construção civil um dos setores que contribui largamente para esses acontecimentos.

Os problemas com a grande taxa de emissões de gases causadores do efeito estufa são evidenciados tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento. Como a construção civil é uma atividade que gera grandes impactos ambientais, 30% das emissões globais de gases de efeito estufa são causados pelas edificações, provenientes do consumo de energia gerada na queima de combustíveis fósseis, quando se considera todo o ciclo de vida das

edificações são gerados 25% dos resíduos sólidos, consumido 25% da água e ocupado 12% das terras (UNEP, 2012).

Como alternativa para a diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil, tem-se realizado estudos sobre a substituição parcial do cimento por adições minerais, considerando que o cimento é um dos principais constituintes do concreto. As adições minerais trazem grandes vantagens, pois reforçam a zona de transição entre a pasta e os agregados, principalmente entre os reciclados, que são responsáveis pela redução da resistência mecânica quando essas adições não são utilizadas, também quanto aos aspectos ambientais, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub>, consumo de energia, e na maioria das vezes diminuindo os custos.

Entre as propriedades que o concreto apresenta e que permitem maior perspectiva em relação à sustentabilidade destacam-se, a durabilidade, resistência à compressão, resistência ao fogo e a agentes naturais, possibilidade de substituir o cimento por adições minerais, e os agregados por resíduos de construção e demolição (RCD).

Neste contexto uma metodologia importante a ser estudada e analisada é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que possibilita avaliar todas as fases de um produto ou processo, “do berço ao túmulo”. Para este estudo dispõem-se da série de normas ISO 14000, que fornecem diretrizes para a gestão ambiental, mas devido à complexidade e o alto custo para a implantação, e muitas vezes recursos humanos indisponíveis, torna-se difícil à realização desta análise. Para tentar facilitar a ACV, o Conselho Brasileiro da Construção Sustentável propôs uma Plataforma Global Simplificada de Avaliação do Ciclo de Vida modular (ACV-m), em que se procura focar nos aspectos ambientais mais relevantes, como consumo de água, matérias-primas, energia, geração de resíduos e emissões de CO<sub>2</sub> (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2014).

O Custo do Ciclo de Vida (CCV) destaca-se por ser uma ferramenta que permite relacionar os aspectos econômico-ambiental, podendo ser definido como os custos totais do sistema em análise, ou seja, desde a sua produção até o fim da sua vida útil, tornando possível selecionar a alternativa mais adequada ambientalmente e financeiramente.

Atualmente, pesquisas voltadas à sustentabilidade de materiais de construção civil tornam-se cada vez mais importantes, destacando-se em nível mundial, devido principalmente a grande importância deste setor para o desenvolvimento da humanidade e preservação ambiental e, principalmente pelo efeito da escala de consumo por este setor industrial. Desta

forma, o estudo visa buscar benefícios para a sustentabilidade da humanidade por meio de soluções tecnológicas simples, realizadas de forma prática e viável.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

A presente pesquisa visa analisar misturas de concreto com agregado graúdo residual de construção e demolição (RCD) e adição mineral através dos ensaios de resistência à compressão axial e durabilidade, para estudo da Avaliação do Ciclo de Vida Simplificado e Custo do Ciclo de Vida, com a utilização de dois tipos de cimento e um tipo de pozolana, dimensionados para um nível de resistência.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- I. Avaliar as misturas de concreto com RCD, com dois teores de substituição do agregado graúdo natural;
- II. Analisar as misturas de concreto quanto à influência do RCD na resistência à compressão axial e módulo de elasticidade longitudinal;
- III. Analisar a influência da cinza de casca de arroz nas misturas de concreto com o cimento CPV – ARI e comparar com as misturas com cimento CPIV;
- IV. Analisar as misturas de concreto quanto à durabilidade por meio do ensaio de carbonatação acelerada;
- V. Identificar e quantificar todos os fluxos – entradas e saídas, que compõem as etapas de construção, uso, manutenção, descarte/reuso, para realizar a Avaliação do Ciclo de Vida;
- VI. Identificar e avaliar o Custo do Ciclo de Vida para cada um dos traços de concreto estudados, para comparar com os resultados obtidos na ACV;
- VII. Classificar a melhor alternativa em relação ao aspecto ambiental e econômico, quando se utiliza concreto com RCD, quando comparados em bases unitárias de resistência por ano ( $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ).

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, apresentados a seguir:

- Capítulo I – apresenta uma breve introdução, justificando os motivos do estudo e apresentando os objetivos, gerais e específicos;

- Capítulo II – engloba o tema sustentabilidade e apresenta aspectos relacionados à Análise do Ciclo e Vida e Custo do Ciclo de Vida;
- Capítulo III – apresenta especificações sobre resíduos de construção e demolição, suas características e interferências quando adicionados ao concreto; e aspectos sobre a durabilidade desses concretos em relação à carbonatação;
- Capítulo IV – aborda a metodologia seguida durante o estudo, como os materiais utilizados e suas caracterizações, ensaios com o concreto quanto à resistência mecânica e durabilidade; e fatores utilizados para a realização do inventário do ciclo de vida;
- Capítulo V – apresenta os resultados e discussões sobre o estudo.
- Capítulo VI – este último apresenta as conclusões e considerações finais, apontando sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO II

### 2 SUSTENTABILIDADE

Nas últimas décadas presencia-se um aumento crescente relacionado às preocupações com os problemas ambientais no mundo inteiro, sendo um dos grandes desafios enfrentados nos dias atuais, que mostram a necessidade de ações educacionais, capazes de disponibilizarem conhecimentos para a construção de um novo modelo de civilização, incentivando as comunidades e entidades em geral, a adotarem práticas e tecnologias sustentáveis para colaborar com a recuperação e preservação ambiental, gerando melhorias na qualidade de vida.

Todo o contexto ambiental motiva cientistas e pesquisadores a promoverem um desenvolvimento ecológico e sustentável, fazendo o uso de materiais que necessitam de menores quantidades de energia, que gerem menos resíduos e poluentes, que sejam facilmente reincorporados pela natureza e mais acessíveis à população.

Um dos principais setores da economia e que está fortemente ligado ao tema sustentabilidade é a construção civil, sendo um indicativo de crescimento econômico e social, mas que também se constitui em uma atividade geradora de grandes impactos ambientais.

Em contrapartida, de acordo com John (2010) a construção civil é o setor que mais possibilita a incorporação de resíduos em novos materiais, já que é a maior consumidora de recursos naturais entre as demais economias. Partindo destes aspectos muitas universidades e até mesmo empresas estudam a possibilidade de redução do uso de matérias-primas e produtos através do aumento da reutilização e da reciclagem.

#### 2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A partir do Relatório de *Brundtland* denominado “Nosso futuro comum” pela *World Commission on Environment and Development* (WCED, 1987) definiu-se o desenvolvimento sustentável como o atendimento as necessidades do presente, sem comprometer o atendimento das necessidades das futuras gerações. De acordo com Holthausen (2002) o termo sustentável surgiu da necessidade de conciliar o crescimento da produção de bens e serviços, destinados ao bem estar das pessoas, com a preservação ambiental do Planeta, incentivando nos anos subseqüentes a realização de grandes conferências mundiais; onde

protocolos internacionais foram firmados com o intuito de rever metas e elaborar mecanismos para o desenvolvimento sustentável.

Em meio às conferências e buscas por sustentabilidade, em 1992 foi publicada a Agenda 21, em forma de um projeto internacional para o desenvolvimento sustentável em todos os setores da economia (*The International Council for Research and Innovation in Building and Construction* e *United Nations Environment Programme - International Environmental Technology Centre*, 2002). A Agenda 21 sugere que seja feita uma interpretação prática dos conceitos de sustentabilidade, a fim de equilibrar os parâmetros de proteção ambiental com as preocupações sociais e econômicas, enfatizando também a importância da gestão dos recursos naturais (*Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento*, 1996).

Uma tendência que vêm crescendo de forma bastante acelerada no mercado é a incorporação de práticas sustentáveis a construção civil, em que Agopyan e John (2011) enfatizam que a dimensão do ambiente construído provoca grandes impactos ambientais, envolvendo o uso de uma grande quantidade de materiais de construção, mão de obra, água, energia e geração de resíduos.

Toda essa eficiência para tentar minimizar o consumo de recursos naturais e conseqüentemente os impactos ambientais, vem incentivando o crescimento do mercado e o tornando cada vez mais competitivo de produtos sustentáveis. Desta forma, dá-se espaço para as organizações criarem um sistema de certificação, os quais são baseados em selos de qualidade para padronizar e quantificar os níveis de sustentabilidade de uma edificação.

No entanto, as atividades relacionadas à construção civil despertam pesquisas com o objetivo de minimizar os impactos ambientais causados por ela, já que este setor só tende a aumentar, pois as buscas por infraestrutura são cada vez mais intensas, como consequência principalmente do crescimento desenfreado da população. De acordo com a ISO 21929-1 9 (2011) a construção civil é considerada um setor de extrema importância para o desenvolvimento sustentável, devido aos seguintes fatores:

- É um setor de grande importância na economia nacional;
- Possui uma considerável interface com a diminuição da pobreza por meio de serviços econômicos e sociais básicos previstos no ambiente construído e as possíveis oportunidades de envolver pessoas de baixa renda na construção, operação e manutenção;
- Por ser um dos maiores setores industriais, fornece muitas oportunidades de emprego, mas em contrapartida necessita de grandes quantidades de recursos naturais, e como

consequência gera sérios impactos sobre as condições econômicas, sociais, e principalmente ambientais.

- O ambiente construído que se cria representa uma parcela significativa das economias dos proprietários, promovendo-se assim sociedades com ambientes físicos e funcionais.
- Conta com importantes oportunidades de melhorar as suas atividades relacionadas aos impactos econômicos, sociais e ambientais.

Voltada a estes fatores, a construção civil tem focado suas atenções quanto aos impactos gerados por suas atividades através de pesquisas, com o intuito de propor soluções que melhorem as práticas construtivas, reduzindo os impactos ambientais, sem, contudo perder a qualidade dos materiais e da construção como um todo.

## 2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS

Nos dias atuais o termo “impacto ambiental” vem ocupando gradativamente o centro das atenções, e com o passar do tempo tem-se aumentado o número de pessoas que começaram a agir, trabalhar, e de maneira geral viver, conscientes de que precisam realizar suas tarefas diárias de forma mais sustentável, considerando a preservação do meio ambiente, reduzindo assim, os impactos ambientais que são continuamente causados.

Com o aumento da conscientização em relação à importância de proteção do meio ambiente e os impactos decorrentes dos produtos, tanto na fabricação como no consumo, impulsionou o aumento do interesse em desenvolver métodos para compreender e proceder com esses impactos, um desses métodos em desenvolvimento é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Conforme a NBR 14040 (2014) a ACV está focada nos aspectos ambientais e nos impactos ambientais potenciais (correspondendo a unidade funcional de um sistema em estudo); como por exemplo, a utilização de recursos naturais e as liberações para o meio ambiente, durante todo o ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem, até a disposição final; sistema conhecido pela expressão “do berço ao túmulo”.

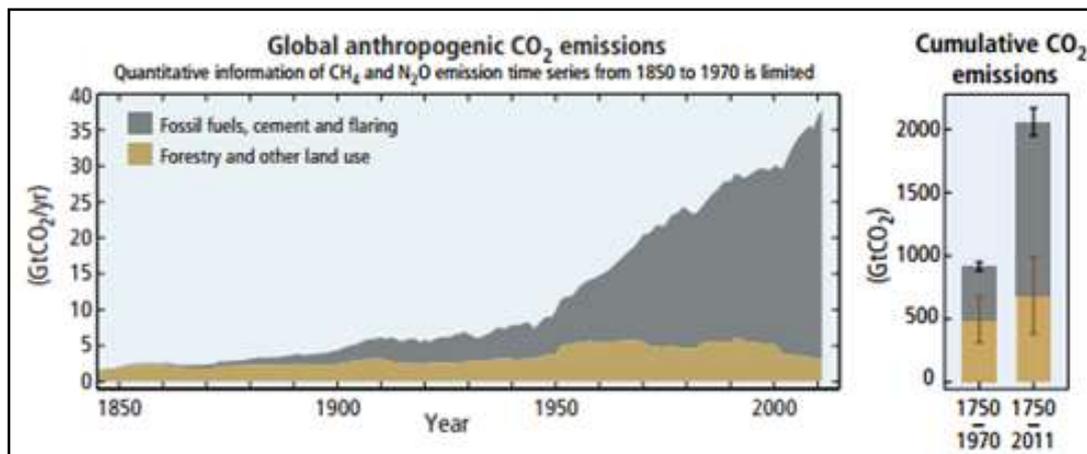
### 2.2.1 Mudanças climáticas e a influência da indústria da construção civil

Os relatórios do *Intergovernmental Panel Climate Change (IPCC)* divulgaram através de dados e cenários futuros o aumento dos gases do efeito estufa (GEE) e o aquecimento global, como consequência disso os desastres ambientais apresentam diferentes

cenários, que são cada vez mais alarmantes, e necessitam que sejam tomadas medidas imediatas pelos governos e sociedades. A ocorrência do efeito estufa é um fenômeno natural, mas que nos últimos anos vem acelerando as mudanças climáticas, devido às concentrações e aumento dos GEE.

Acompanha-se constantemente por meio de noticiários e acontecimentos que o aquecimento global reflete no aumento das temperaturas em várias regiões, e essas alterações vem ocorrendo cada vez com maior frequência. O relatório do *IPCC (2014)* evidencia que entre os anos 1750 e 2011, as emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> cumulativas para a atmosfera foram  $2040 \pm 310$  Gt de CO<sub>2</sub>, e em torno de 40% dessas emissões manteve-se na atmosfera ( $880 \pm 35$  Gt de CO<sub>2</sub>); sendo que o restante foi removido a partir da atmosfera e armazenado em terra (plantas e solos) e no oceano. No entanto, o oceano absorveu cerca de 30% do CO<sub>2</sub> emitido, causando a acidificação dos mesmos. Cerca da metade das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> ocorreram nos últimos 40 anos, como pode ser observado na Figura 2.1, também por meio da mesma pode-se perceber que as maiores emissões de CO<sub>2</sub> são liberadas por combustíveis fósseis, cimento e queima, em comparação à silvicultura e outros usos da terra.

Figura 2. 1 - Emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> globais  
A informação quantitativa de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O emitidos em série entre 1850 e 1970 é limitada



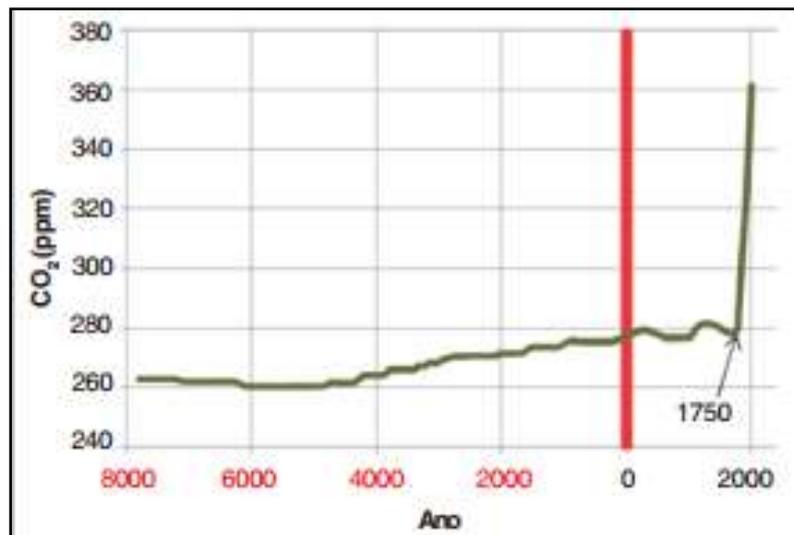
Fonte: Adaptado do *IPCC, 2014*

Entre as emissões de poluentes que são liberadas pelos diferentes setores da economia, destaca-se o setor da construção civil. De acordo com GOEDKOOOP et al (2013) além da construção civil consumir grandes quantidades de recursos naturais não renováveis, ela também emite gases para a atmosfera. E, de acordo com a *United States Environmental Protection Agency (2009)* os inúmeros gases lançados na atmosfera podem permanecer por

diferentes períodos de tempo, sendo alguns por poucos anos e outros até milhares de anos, período suficiente para que se distribuam por toda a Terra.

Com o crescente aumento da população, acelera-se o consumo de recursos naturais não renováveis, devido, sobretudo, pelo maior número de veículos, necessidade de infraestrutura e avanços na economia, que de uma forma ou de outra consomem esses recursos. De acordo com John (2010) foi por volta do ano de 1750, após o início da Revolução Industrial que as concentrações de CO<sub>2</sub> começaram a aumentar, como pode ser observado na Figura 2.2. Em que as principais fontes geradoras desses gases são a queima de carbono fossilizado – carvão mineral ou petróleo, a queima ou apodrecimento de florestas nativas e manejo do solo. E em relação à construção civil, que utiliza quantidades significativas de materiais cerâmicos, cimento e aço, necessitam de energia fóssil para a sua produção.

Figura 2. 2 - Aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera



Fonte: John, 2010

Agopyan e John (2011) citam que o intenso consumo de combustíveis fósseis tem causado fortes impactos ambientais devido às emissões de carbono, incentivando a busca por tecnologias mais sustentáveis para a produção de energia, diminuindo assim as emissões, e visando o uso mais eficiente dos recursos naturais e energia.

Como destacado pela *UNEP* (2009) a construção civil é responsável por 30% das emissões de gases que contribuem para o efeito estufa, e esse valor tende a aumentar de forma significativa nos próximos anos. Entre os diferentes materiais que são utilizados na construção

civil, somente a indústria de cimento libera cerca de 10% do total de emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil (JOHN, 2005). No entanto, esses dados evidenciam a grande quantidade de recursos naturais que são utilizados e as consideráveis emissões de gases contribuintes para o efeito estufa.

### **2.2.2 Produção de concreto e o consumo de recursos naturais**

A intensa demanda por concreto tem como consequência o enorme consumo de cimento, que é um dos seus principais constituintes. Os dados apresentados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (BRASIL, 2015) apontam que a quantidade de cimento consumida no ano de 2014 teve um aumento de 1,8% em relação ao ano anterior, chegando a uma margem de 350 kg de cimento por habitante. Por sua vez *The European Cement Association* (CEMBUREAU, 2013) enfatiza que o cimento é responsável por aproximadamente 5% das emissões globais de gases do efeito estufa, pois para a sua produção necessita-se de energia (combustíveis e eletricidade), liberando assim CO<sub>2</sub> e outros gases.

Além das poluições emitidas pelo cimento, os agregados utilizados na produção do concreto também contribuem em menor escala para os impactos ambientais, considerando-se que a extração de areia e de pedra podem causar desmatamentos, bem como a destruição da fauna e da flora; destruição do fundo dos rios; assoreamentos; alterações nos cursos de água, entre outros. Em relação ao grande consumo de agregados demandados pela construção civil, dados apresentados pelo DNPM (BRASIL, 2015) indicam o consumo aparente brasileiro dos principais produtos minerais, sendo que o consumo de areia para construção civil referente ao ano de 2014 foi cerca de 392 milhões de toneladas, já o consumo de brita e cascalho para o mesmo período foi em torno de 309 milhões de toneladas, valores estes bastante significativos.

Contudo, através dos dados apresentados sobre consumo de recursos naturais e impactos ambientais demandados por meio da extração dos mesmos, percebe-se uma perspectiva de esgotamento desses recursos, despertando a necessidade de alternativas que possam substituí-los.

### 2.2.3 Substituição de recursos naturais por materiais alternativos

Nos últimos anos a indústria da construção civil tem buscado, de maneira constante e bastante insistente utilizar materiais alternativos com o objetivo de atender aos requisitos para o desenvolvimento sustentável. Entre esses materiais destacam-se as pozolanas, que são definidas pela NBR 12653 (2015) como materiais silicosos ou silicoaluminosos, que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando divididas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

Com o intuito de reduzir o impacto ambiental global por meio da redução das emissões de CO<sub>2</sub>, existem estudos sobre a utilização de adições minerais, pois além de diminuir os custos quando incorporadas ao cimento Portland, também melhoram as propriedades do concreto e contribuem para a sustentabilidade. Desta forma, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as adições minerais melhoram as propriedades do concreto, como a microestrutura, reduzem a segregação e exsudação devido à segmentação dos canais de percolação da água e promovem o aumento de locais de nucleação para os produtos de hidratação, fazendo com que a pasta fique mais homogênea. Com isso, os grãos menores, por efeito físico, diminuem o efeito parede na zona de transição devido ao empacotamento dos poros, promovendo o aumento da resistência.

Existem inúmeros efeitos ocasionados pelas pozolanas altamente reativas como, sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante, entre outras, quando adicionadas ao concreto, e conforme Mehta e Monteiro (2008) esses acontecimentos ocorrem devido às características das partículas. Um dos efeitos causados é o microfilar que está relacionado ao aumento da densidade da mistura ocasionado pelo tamponamento dos poros causado pelas pequenas partículas das pozolanas. O segundo efeito citado pelos autores é o efeito da reação pozolânica, sendo que a sílica amorfa que está presente nas pozolanas altamente reativas consome ácido clorídrico (CH), promovendo a alteração da microestrutura da zona de transição da pasta com o agregado, resultando em uma interface menos porosa e mais uniforme, melhorando assim, as propriedades do concreto.

A substituição de pozolanas por materiais constituintes do concreto, não só contribui para a redução dos impactos ambientais, como também melhora as propriedades desse novo material. Desta forma Isaia (1995) menciona que as pozolanas são acrescentadas ao concreto de alto desempenho com o objetivo de alcançar uma microestrutura mais compacta e uniforme, o que resulta em um concreto com maior desempenho em relação ao concreto

convencional, sem adições, no que se refere à durabilidade, desempenho e vida útil da estrutura de concreto.

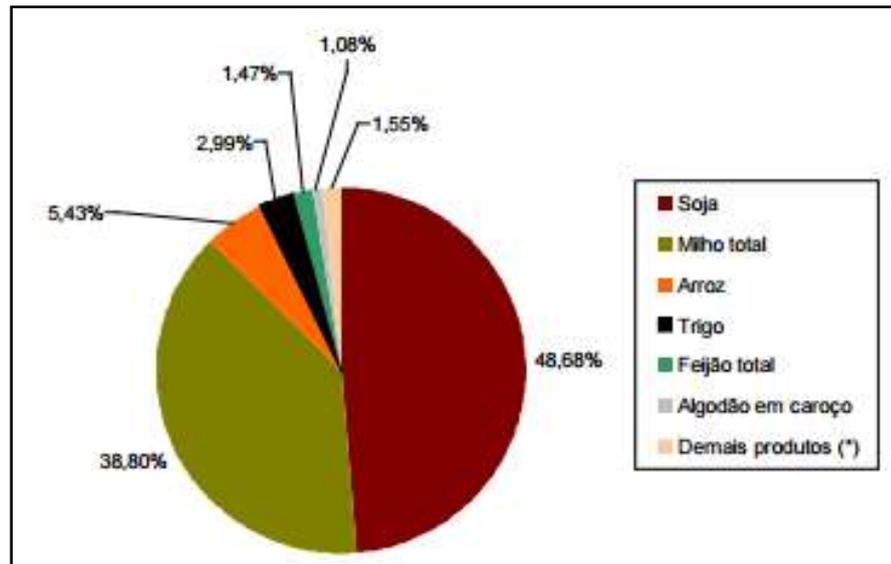
### *2.2.3.1 Cinza de casca de arroz (CCA)*

A cinza de casca de arroz é um subproduto agroindustrial, resultante da queima da casca de arroz, podendo ser por meio da queima a céu aberto (sem controle de temperatura), pela combustão controlada ou ainda em fornos industriais. Esta cinza é oriunda do beneficiamento do próprio grão, utilizando a casca de arroz (CA) como fonte de energia ou pela combustão dos processos industriais.

Entre os diversos tipos de materiais pozolânicos, a CCA é um dos subprodutos cada vez mais estudado e utilizado nas últimas décadas, tendo como propósito tentar reduzir os impactos ocasionados ao meio ambiente e ao mesmo tempo melhorar as propriedades do concreto, pois existem inúmeras pesquisas que apontam a viabilidade de substituir-se parcialmente o cimento por subprodutos agroindustriais.

Um dos fatores que contribuem para a crescente utilização da CCA é a grande quantidade de arroz que se produz no Brasil, principalmente no estado do Rio Grande do Sul. Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017) a média nacional para o ano de 2016 foi de 10,9 milhões de toneladas. E no Rio Grande do Sul, que é o maior produtor do país, com 71,9% de participação da produção nacional, a produção foi em torno de 7,8 milhões de toneladas. Ainda de acordo com o IBGE (2017), nos principais estados produtores, a produção de arroz tem sido beneficiada devido às condições climáticas, e a safra deve crescer 11,1% em relação ao ano de 2016. Também conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (2016) a produção de arroz é a terceira maior do país, com 5,3% da produção total dos produtos cultivados, ficando atrás apenas da produção de soja e milho, como pode ser observado na Figura 2.3.

Figura 2. 3 - Porcentagens da produção total por produto cultivado no Brasil



Fonte: Adaptado da CONAB (2016)

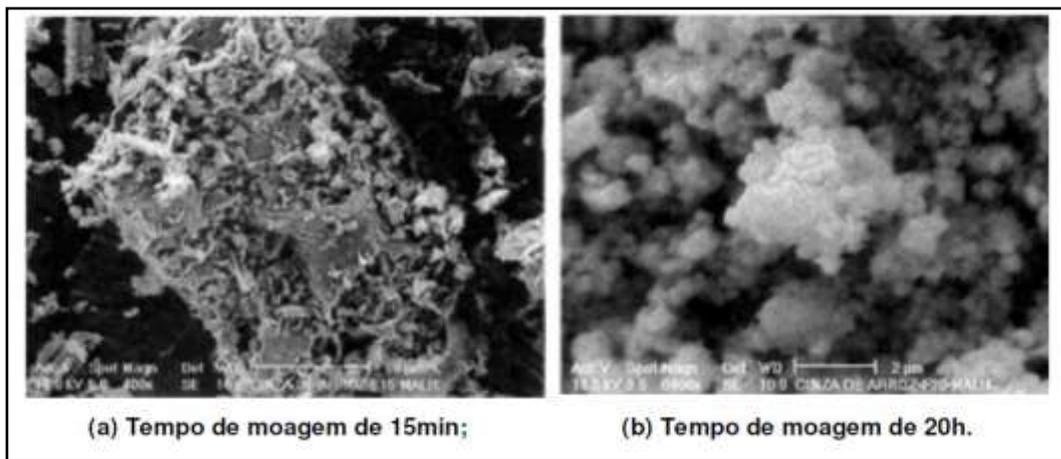
Como a produção de arroz é intensa em várias regiões, geram-se grandes quantidades de casca, pois segundo Mehta e Monteiro (2008) 20% da produção é casca. Em consideração a isso, existem inúmeras pesquisas voltadas para a reutilização deste resíduo agroindustrial, pois ele traz benefícios às propriedades de outros materiais quando a eles incorporada, como por exemplo, o concreto, sendo também uma forma de dar um destino adequado quanto à poluição ambiental, diminuindo as emissões de CO<sub>2</sub> devido à redução da produção de cimento.

Contudo, existem alguns procedimentos que alteram as propriedades da CCA influenciando nas características dos produtos que ela constitui, entre estes procedimentos estão o tipo de queima e a temperatura, bem como o tempo de moagem. Através de estudos experimentais com o objetivo de alcançar condições ótimas de queima para produção de cinzas com reatividade pozolânica, Mehta (1992) afirma que quando a temperatura de queima fica na faixa de 500 a 700 °C ou quando o tempo de combustão é menor que um minuto em temperaturas em torno de 700 a 800 °C, a sílica residual mantém-se em estado amorfo e com alta porosidade interna, indicada pela área específica de 50m<sup>2</sup>/g a 100m<sup>2</sup>/g, medida pelo método de adsorção de nitrogênio. Conforme Isaia (1995) a reatividade da CCA é semelhante ou até maior que a micro sílica, e quando a temperatura é controlada apresenta boa atividade, independentemente do processo de queima.

Além do controle da temperatura de queima, o processo de moagem da CCA também tem interferência em sua reatividade. A moagem é definida por Cordeiro et al. (2009) como a

fragmentação de uma estrutura sólida, quando submetida a esforços mecânicos, concedendo maior compacidade a mistura quando esses esforços são aplicados por elementos que provocam deformações nas partículas, o que acaba por tornar as partículas primeiramente aciculares, mais próxima da forma esférica, como pode ser observado na Figura 2.4.

Figura 2. 4 - Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da CCA com diferentes tempos de moagem



Fonte: Santos (1997)

No entanto, a moagem da CCA é um procedimento que modifica a sua estrutura e altera suas propriedades, resultando em mudanças nas propriedades do concreto quando a ele esta cinza for adicionada. Mehta e Monteiro (2008) mencionam que quando a CCA é finamente moída, com diâmetro médio das partículas menores que  $0,1 \mu\text{m}$  ela adquire propriedades pozolânicas. Possibilitando assim, a sua substituição parcial pelo cimento na produção de concreto, trazendo como benefício para este material o aumento da durabilidade e da resistência mecânica.

Como as pozolanas apresentam diferentes níveis de reatividade, que dependem da maneira como elas foram preparadas, Mehta e Monteiro (2008) dividem a CCA em duas categorias que são apresentadas a seguir:

- Pozolana com pouca reatividade: quando a queima ocorre em campo e a CCA é constituída essencialmente de silicatos cristalinos, com pequena quantidade de matéria não cristalina, o que indica que este material necessita de moagem até se tornar um pó muito fino, para então desenvolver atividade pozolânica.
- Superpozolana: quando a queima é controlada e constituída essencialmente de sílica pura, em forma não cristalina e em estrutura celular;

Portanto, a utilização de pozolanas é de grande interesse entre os pesquisadores, devido às características apresentadas, e também através de estudos que comprovam a sua eficiência em relação às propriedades do concreto.

### 2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Como a questão ambiental vem ganhando o centro das atenções pela sociedade em geral, foi necessário desenvolver ferramentas de gestão, possibilitando tanto as instituições de ensino e pesquisas, como governo e empresas, avaliarem as suas consequências ambientais relacionadas com as decisões tomadas durante os seus processos ou produtos. Entre essas ferramentas destaca-se a avaliação do ciclo de vida (ACV) que pode ser utilizada durante o desenvolvimento e melhoria do produto; definição de projetos estratégicos e políticas públicas; gestão de impactos ambientais de produtos e serviços, entre outros.

Ao considerar a ACV, é de grande valia frisar que durante a avaliação do desempenho ambiental de um produto, processo ou serviço, deve-se considerar o consumo de recursos naturais como um todo, e não apenas a disposição de rejeitos. Relacionado a esses aspectos, Sonnerman (2002) menciona que a ACV só atingirá um desempenho ambiental consideravelmente bom, se a cadeia produtiva não for considerada isolada, pois sendo analisada desta forma não se consegue garantir que ela tenha sustentabilidade; somente se alcança essa condição se a cadeia produtiva for analisada na sua totalidade e todos os elos apresentarem desempenho ambiental adequado.

A *United Nations Environment Programme (2009)* define a ACV como uma técnica, que tem como objetivo abordar os aspectos ambientais de um produto e seus impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida, desde a extração e produção da matéria-prima, fabricação, distribuição, uso, reuso, manutenção, reciclagem e disposição final, ou seja, todas as fases de vida do produto, denominada do “berço ao túmulo” (*cradle to grave*).

Os estudos voltados a ACV tiveram início nos anos de 1960, segundo Curran (2006) em decorrência do interesse e necessidade relacionados às limitações de recursos naturais em perspectiva futura. Sendo o estudo realizado por Harold Smith na *World Energy Conference*, em 1963, um dos primeiros relacionados com cálculos de demanda energética necessária para a produção de determinados insumos químicos. No entanto em 1969, foram realizados estudos para uma empresa de grande importância, produtora de refrigerantes, com o intuito de comparar os diferentes tipos de embalagens de bebidas, o que deu origem a atual metodologia

de análise de inventário do ciclo de vida. Desta maneira, a metodologia foi sendo aperfeiçoada e, para fins de uniformização de processos de avaliação, na década de 1990, foi publicada pela *International Organization for Standardization* (ISO) a série de normas ISO 14000. Essa série de normas engloba a série 14040 que apresenta o padrão da metodologia. No Brasil, as transcrições dessas normas foram realizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), englobando as NBRs como:

- NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura (ABNT NBR ISO, 2014): Esta norma apresenta os conceitos dos principais termos, descrevendo os princípios e a estrutura para a realização e o relato dos estudos da ACV, mas não descreve os detalhes técnicos e não especifica metodologias para as etapas individuais;

- NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações (ABNT NBR ISO, 2014): complementa a anterior, pois especifica as condições e apresenta as orientações para a elaboração da ACV. Detalhando a metodologia, sendo utilizada juntamente com a norma NBR ISO 14040.

No entanto, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), apresenta a estrutura da ACV, que contempla quatro fases que estão detalhadas nos próximos itens.

### **2.3.1 Objetivo e Escopo**

Esta fase deve ser a primeira a ser analisada, sendo que o escopo, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhes, depende do uso pretendido para o estudo, bem como do objeto, pois conforme o objetivo do estudo, a profundidade e a abrangência de uma ACV podem variar de maneira significativa. A ACV também é considerada uma técnica iterativa, pois logo que os dados e as informações são arrecadados, diferentes aspectos do escopo podem necessitar modificações para tentar atender ao objetivo inicial do estudo.

Ao considerar que os demais parâmetros para elaborar as etapas subsequentes da ACV têm como base as definições do escopo, necessita-se que ele seja bem definido. No entanto, é importante frisar o seu caráter preliminar, compreendendo que a ACV é uma técnica iterativa e, na medida em que são coletados os dados e as informações, muitas vezes é necessário fazer revisões para atingir o objetivo original que foi inicialmente proposto.

Conforme Guinée (2002) o escopo deve abranger a cobertura geográfica, temporal e tecnológica do estudo, bem como o nível de aprofundamento necessário para satisfazer o objetivo inicialmente definido, que compreende a aplicação pretendida; os motivos para

executar o estudo e o público-alvo. E por sua vez o escopo inclui alguns itens, como: definição do sistema de produto que será estudado; unidade funcional; fronteira do sistema que foi definido; requisitos de dados; limitações; entre outros aspectos. Entre esses itens, a unidade funcional é destaca por Heede e Belie (2012) devido a sua importância, pois ela serve como base do sistema de produto para a realização do cálculo do impacto ambiental.

No entanto, a unidade funcional adotada para estudo, pode ser dos mais variados tipos, mas necessita-se que se faça uma análise criteriosa para defini-la, possibilitando conclusões aceitáveis e passíveis de comparação de uma ACV. A unidade funcional é que define as características de desempenho do produto, sendo o seu primeiro propósito fornecer uma referência para relacionar as entradas e saídas.

### **2.3.2 Inventário do Ciclo de Vida**

Esta fase compreende a coleta de dados, com o objetivo de quantificar os aspectos ambientais do ciclo de vida do produto analisado. De acordo com Arena et al. (2003) e Vitale et al. (2017), o inventário do ciclo de vida identifica e quantifica as intervenções no meio ambiente dentro do limite do sistema, resultando em uma lista de matérias-primas e insumos de energia e emissões para o ar e água, bem como os resíduos sólidos. Desta forma, os procedimentos iniciais são coleta de dados e a conversão desses dados em fluxos de entrada de matéria-prima e energia para cada um dos processos, e de saída para o meio ambiente. Para facilitar a coleta de dados, podem ser feitos fluxogramas de processo, elaborar questionários para aplicar a indústrias e empresas que compõem a cadeia produtiva, ou também se pode valer de dados de relatórios e publicações técnicas de domínio comum, mas sempre voltando à atenção em relação ao grau de confiabilidade e adequação aos elementos em estudo. Por sua vez Seo e Kulay (2006) mencionam que nesta segunda fase da ACV são coletadas e quantificadas todas as variáveis relacionadas ao ciclo de vida de um produto, serviço ou atividade, tais como: matéria-prima, energia, transporte, emissões, efluentes, resíduos sólidos, entre outros fatores.

O inventário de ciclo de vida (ICV) é a fase que abrange a compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema ou produto durante o seu ciclo de vida, e a análise deste inventário é um procedimento iterativo, pois assim como os dados são coletados e submetidos ao conhecimento sobre o sistema, podem ser identificados novos requisitos ou limitações, necessitando mudanças na coleta de dados, para que os objetivos do estudo ainda possam ser

satisfeitos. Nesta fase ainda podem-se identificar condições que necessitem de revisões do objetivo ou do escopo do estudo.

O ICV pode ser descrito de diferentes formas por autores que estudam o assunto. Para John et al. (2014) o inventário é uma matriz significativa de um sistema de produção de um produto ou serviço que requer tempo e recursos financeiros para a sua construção, considerando-se que existem muitas informações que devem ser coletadas sobre o produto a ser analisado. No entanto, este processo torna-se mais simplificado quando através de um banco de dados facilitam-se os acessos as informações, mas, no entanto, não há dados suficientes de uma ACV com todas as informações necessárias sobre determinado ciclo de vida de um produto. Isso faz com que se necessite de diferentes bases de dados, sendo que os dados da região onde o ciclo de vida do produto ocorre é importante para que a ACV seja representativa. Desta forma, o inventário descreve as técnicas utilizadas nos procedimentos produtivos, mas os resultados podem variar bastante para sistemas de produção similares, pois dependem da gestão e do local de produção.

### **2.3.3 Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida**

Esta fase objetiva estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, valendo-se dos resultados obtidos do ICV. Desta maneira, para entender tais impactos, esse processo associa dados de inventário com categorias de impacto específicas, e ainda fornece informações para a fase de interpretação do ciclo de vida.

Esta etapa da ACV representa uma técnica tanto qualitativa como quantitativa, sendo utilizada no entendimento e avaliação da intensidade e significância dos impactos ambientais, tendo como base os dados resultantes do ICV, e através da etapa de objetivo e escopo determinando os impactos que serão considerados, os níveis de detalhes, bem como a metodologia a ser adotada. Desta maneira, os resultados obtidos através do inventário são convertidos por meio da análise dos impactos em um grupo selecionado como, efeito estufa, destruição da camada de ozônio, mortalidade, toxicidade, ocupação de área, entre outros (SEO E KULAY, 2006).

Conforme a NBR ISO 14044 (ABNT, 2014) a avaliação de impactos de ciclo de vida consiste em elementos obrigatórios e opcionais, que são:

Obrigatórios:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização: as escolhas devem considerar a abrangência e relevância do âmbito do estudo que foram definidas no objetivo e escopo;
- Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação): envolve a atribuição qualitativa dos aspectos identificadas no ICV entre as categorias de impacto de acordo com a sua capacidade de contribuição;
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização): é a conversão quantitativa de todas as contribuições contidas em uma mesma categoria de impacto.

Opcionais:

- Normalização: consiste no cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria em relação a um valor de referência, como por exemplo, impacto ambiental médio gerado por um cidadão europeu durante certo período de tempo;
- Agrupamento: agregação e possível hierarquização das categorias de impactos, como por exemplo, efeito local, regional ou global;
- Ponderação: conversão e agregação dos resultados dos indicadores entre as diferentes categorias de impacto, fazendo o uso de fatores numéricos com base na escolha de dados;
- Análise da qualidade dos dados: utilização de técnicas com o objetivo de melhorar a compreensão e confiabilidade dos resultados.

Conforme o *Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment* (2000) objetivando a quantificação da carga ambiental total com base no ciclo de vida de um produto, fazem-se o uso de *Eco-Indicadores*, que são números que representam os impactos ambientais, quanto maiores os valores, maiores são os impactos. O *Eco-Indicator 99* (PRÉ, 2017) pode ser tomado como exemplo, pois realiza análises baseadas em três categorias de danos, cada uma com seus indicadores, que são:

- Qualidade do ecossistema - ecotoxicidade, acidificação, eutrofização e uso da terra;
- Saúde humana - alterações climáticas, destruição da camada de ozônio, efeitos cancerígenos, efeitos respiratórios e radiação ionizante; e
- Recursos naturais - esgotamento de recursos fósseis e minerais.

Ainda conforme este Manual é destacado que o projetista deve avaliar inúmeras opções durante a etapa de projeto, e são os *Eco-Indicadores* que contribuem para a tomada de decisões.

### **2.3.4 Interpretação do Ciclo de Vida**

Esta fase da ACV considera em conjunto as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto. Espera-se que a fase de interpretação da ACV apresente resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos e que conduzam a conclusões, expliquem limitações e forneçam recomendações.

Considerando que todas as análises iniciais realizadas para uma ACV interferem em seu resultado final, é necessário avaliar os resultados obtidos antes da elaboração do relatório final. Conforme Chehebe (2002) o objetivo da etapa de interpretação é analisar os resultados, tirar conclusões, explicar as limitações e proporcionar recomendações para uma análise completa do ciclo de vida do produto em estudo.

Por sua vez Curran (2006) enfatiza que os estudos de uma ACV podem necessitar de superposições, estimativas e decisões técnicas, que devem ser apresentadas de forma clara e de maneira a justificar as conclusões resultantes. Dependendo da precisão e confiabilidade dos resultados finais, ao término do estudo pode-se definir qual a melhor alternativa entre as demais que foram analisadas. Contudo, quando os resultados não permitem, tem-se como conclusão uma melhor compreensão dos impactos que são gerados, como suas respectivas magnitudes, seus prós e contras associados.

A fase de interpretação de uma ACV pode ser dividida em etapas, desta forma Chehebe (2002) as classifica como apresentado a seguir:

- Identificação das questões ambientais mais acentuadas com base nos resultados da análise do inventário;
- Avaliação, que abrange elementos tais como verificação da integridade, sensibilidade e consistência; e
- Conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões ambientais mais importantes.

### **2.3.5 Avaliação do Ciclo de Vida relacionado à Construção Civil**

A avaliação do ciclo de vida (ACV) vem sendo cada vez mais utilizada e valorizada por diversas áreas, pois inúmeros estudos apontam a sua eficiência, tanto em relação ao melhoramento das propriedades dos produtos, como na redução dos impactos ambientais. Para Seo e Kulay (2006) a ACV vêm se constituindo de maneira acelerada em uma

ferramenta de considerável importância de gestão ambiental, possivelmente por ser a única de sua classe que permite a identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de um produto, bem como a comparação ambiental de produtos que exercem a mesma função. Por outro lado, um dos fatores que dificultam a sua maior difusão é o elevado custo de sua execução, devido principalmente à quantidade de dados que devem ser coletados. Conforme Ding (2014) a ACV é uma ferramenta ideal quando se busca analisar os impactos ambientais de materiais de construção civil. Leme et al. (2014) enfatiza que essa ferramenta além de medir, compara os impactos ambientais causados pelas atividades humanas, fornecendo uma visão geral do perfil ambiental.

A ACV abrange muitos dados para ser concluída, pois o objetivo é analisar todos os fluxos de materiais e energia que fazem parte do ciclo de vida do produto. Seo e Kulay (2006) mencionam que em muitos casos, a coleta de dados para a ACV acaba sendo inviabilizada devido a inúmeros motivos, como por exemplo, pelo desinteresse das empresas ou setores produtivos, bem como a preservação da confidencialidade na utilização de informações voltadas a certos insumos e tecnologias. Mesmo assim, existem inúmeros estudos sobre a Avaliação do Ciclo de Vida relacionado à construção civil. Gursel et al. (2014) pesquisou sobre o inventário do ciclo de vida da produção de cimento, para poder melhorar a utilidade da sua produção. Já Ingrao et al. (2014) analisou o inventário de um galpão pré-fabricado e a utilização de blocos. E Cuenca-Moyano et al. (2017) desenvolveu um inventário do ciclo de vida sobre a utilização de agregados miúdos reciclados na composição de argamassas, para ser utilizado em estudos posteriores.

Uma das alternativas para o problema de coleta de dados e a enorme abrangência necessária para a realização de uma ACV é apresentada pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2014), em que enuncia a possibilidade de avaliar o ciclo de vida de um produto ou serviço da construção civil, com o emprego da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida Modular (ACV-m), que utiliza os impactos ambientais mais críticos do setor. Mesmo que a ACV-m tenha sido primeiramente desenvolvida para estudos voltados a blocos de concreto, ela tem validade na quantificação dos fluxos de entrada e saída para os componentes de concreto em geral, considerando os indicadores principais, como: uso de recursos naturais; consumo de energia e água; mudanças climáticas e geração de resíduos.

Entre a ACV tradicional e a ACV-m há inúmeras diferenças para a execução, fazendo com que a ACV-m, ou também conhecida como ACV simplificada, seja mais viável e acessível. De acordo com John et al. (2014) a ACV tradicional necessita que sejam medidos os fluxos de energia e matéria-prima ao longo do ciclo de vida, dependendo assim, de uma

enorme quantidade de informações, como: custo bastante elevado; longo período para ser concluído; equipamentos e recursos humanos; sendo muitas vezes inviável para determinadas regiões, dificultando desta forma a sua realização. E mesmo que se faça o uso de dados virtuais de alguns bancos de dados, esses dados podem não ser representativos do processo. Ainda conforme os autores, neste contexto a ACV-m busca reduzir as quantidades de informações, concentrar impactos principais, sendo acessível a pequenas e médias empresas, reduzindo os custos e tempo de execução. Apesar de não serem contemplados todos os impactos, ainda existe representatividade nesta modalidade de abordagem da ACV porque integra os principais grupos que são responsáveis pelo efeito estufa e de uso de recursos naturais.

É indispensável que se identifique com bastante atenção as partes constituintes da ACV que podem ser retiradas ou simplificadas, sem comprometer os resultados finais de maneira significativa, já que a simplificação pode acabar afetando a confiabilidade dos resultados. Outra modalidade de abordagem é dada por Agopyan e John (2011), e também enfatizam que para popularizar a ACV existe uma única opção, que é o desenvolvimento de modelos simplificados, devendo levar em consideração as declarações ambientais do produto e quantidade de entrada de insumos e energia, assim como de despacho de produtos e resíduos registrados no sistema de gestão da empresa, contemplando com dados de emissões de poluentes para a água e o ar, conseguidos de maneira automática e contínua.

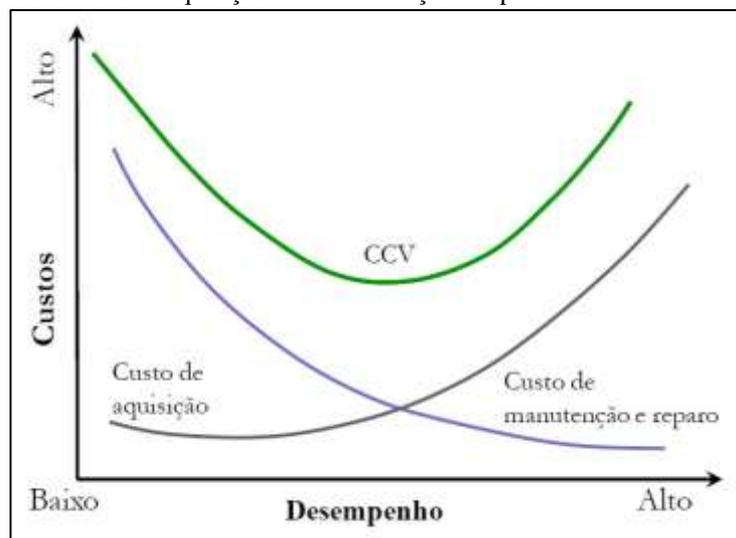
Na indústria da construção civil, conforme Guoguo (2009) a ACV pode ser empregada em dois níveis, que são: avaliação de materiais de construção e componentes e avaliação de edifícios. Sendo que a avaliação de materiais compreende a realização de análise comparativa entre alternativas voltadas a suas melhorias e desenvolvimento técnico, além disso, como forma de entrada para ACV de um edifício como um todo. No entanto, a avaliação da edificação é dirigida com o objetivo de suporte à tomada de decisão, tanto na fase de projeto e construção, como em situações de utilizações posteriores. De acordo com o mesmo autor, cada uma das fases de uma ACV deve ser tratada separadamente no ICV, mesmo que exista uma inter-relação entre essas fases que compõem o ciclo de vida de um produto da construção civil, como o planejamento, utilização, construção, manutenção, reconstrução, demolição e reciclagem, pois dependendo das condições de contorno idealizadas, os objetivos e o escopo podem necessitar ajustes.

## 2.4 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA

A norma ISO 15686-5 (2008) conceitua o custo do ciclo de vida (CCV) como a quantificação do custo de um produto ou de suas partes ao longo do ciclo de vida, visando o atendimento aos requisitos de desempenho para os quais o mesmo foi empregado. No entanto, a análise do CCV deve abranger uma série de custos durante um determinado período de tempo, que são de interesse do ciclo de vida, como os custos de construção, manutenção, operação e disposição final.

Considerando que a análise do CCV da edificação constitui-se em uma importante alternativa para considerar a vida útil no projeto, Possan e Demoliner (2013) mencionam que os fatores que intervêm no projeto, execução e manutenção das opções de projeto podem conduzir a custos menores de operação, manutenção, reparo e reabilitação durante a vida útil de uma edificação. Os autores salientam que partindo deste pressuposto gera-se uma curva de desempenho e uma de custos ao longo do tempo, como pode ser analisada na Figura 2.5.

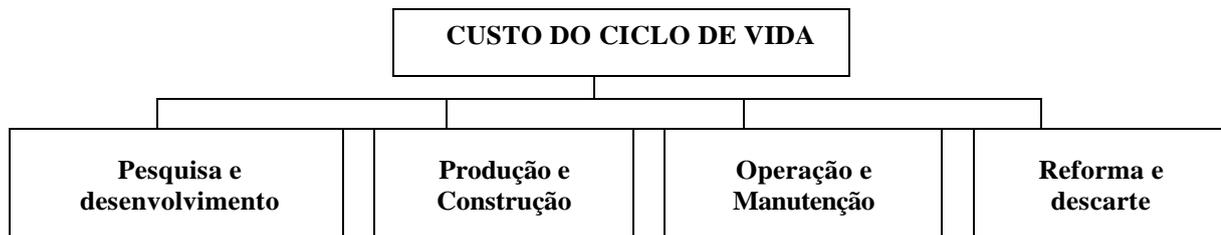
Figura 2.5 - CCV relacionando o custo de aquisição e de manutenção e reparo



Fonte: Possan e Demoliner, 2013

Os estudos do CCV podem abranger o ciclo de vida por inteiro, ou para uma combinação de fases que se pretende avaliar, sendo assim, Dhillon (1981) exhibe um fluxograma simplificado das etapas que são possíveis considerar em um CCV quanto à indústria da construção, que está representado na Figura 2.6.

Figura 2. 6 – Fluxograma simplificado das etapas do CCV



Fonte: adaptado de Dhillon (1981)

Por sua vez Mearig et al (1999) também mencionam que a análise do CCV pode incluir todo o ciclo de vida, ou pode ser simplificado. Podendo ser dividido nas etapas a seguir:

- Investimentos iniciais;
- Custos operacionais;
- Custos de manutenção e reparos;
- Custos de substituição; e
- Custos residuais e totais.

Ainda conforme os autores, as investigações podem ser realizadas através de três níveis de detalhamento, como: âmbito estratégico, onde se aborda tópicos como segurança e durabilidade; sistema, como por exemplo, avaliar o sistema de uma edificação; e minucioso, em que se analisa um material em específico.

Mesmo que na cadeia produtiva da construção existem inúmeras variáveis, o CCV precisa conter questões consideravelmente simples, como as necessidades atuais e futuras, bem como os custos, determinando-se o período de tempo futuro, relacionado à construção civil necessita-se estabelecer a vida útil da construção, para que se consiga prever manutenções e reposições. Nesses aspectos há possibilidades de abordar de maneira conjunta a ACV e o CCV conforme Guoguo (2009) considerando-se que ambas são ferramentas quantitativas para análises do mesmo período de tempo e com foco em ações futuras, mesmo assim, essas duas metodologias apresentam algumas divergências que estão representadas na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1 - Divergências entre CCV e ACV

<b>DIFERENÇAS</b>	<b>ACV</b>	<b>CCV</b>
Método	De cima para baixo ou vice-versa	De baixo para cima
Objetivo	Impactos ambientais	Valor econômico
Escopo	Materiais e produtos	Custos
Avaliação de impactos ambientais	Ar, solo, água	Não considerado
Cálculo de custos	Não considerado	Custo total do sistema

Fonte: adaptado de Guoguo, 2009

No entanto, para que se consiga agrupar a ACV e o CCV necessita-se avaliar incoerências, como a vida útil e a unidade funcional de uma estrutura. Mas deve-se considerar que a vida útil de um produto difere de outro, sendo que eles podem variar nos preços em tempo menor ao tempo que passa a não desempenhar normalmente suas funções. Desta maneira Lützkendorf et al. (2004) afirmam que a relação entre a ACV e o CCV torna-se conveniente para propostas mais sustentáveis, pois auxilia na busca pelo equilíbrio entre questões ambientais e custos.



## CAPÍTULO III

### 3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

A indústria da construção civil é um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de um país, no Brasil é responsável por cerca de 14% do Produto Interno Bruto (PIB), mas por sua vez, gera consideráveis impactos ambientais, tanto pelo consumo de recursos naturais (cerca de 20 a 50% do consumo total), como pela geração de resíduos (PAZ E LAFAYETTE, 2016). Para minimizar os problemas causados pela construção civil, é apresentado por Medeiros et al (2003) a reutilização ou reciclagem dos rejeitos, que apesar desses procedimentos terem começado na Europa depois da Segunda Guerra Mundial, no Brasil ainda encontram-se em atraso, mesmo com os problemas de escassez das áreas para aterros, principalmente em regiões metropolitanas.

Os resíduos gerados pela construção civil são definidos pela resolução do CONAMA nº 307 (2002) e pela NBR 15113 (ABNT, 2004) como resíduos provenientes de construções, reparos, reformas e demolições, consequentes de escavações de terrenos, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, tintas, colas, madeiras, compensados, gesso, forros, argamassas, telhas, pavimentos asfálticos, plásticos, tubulações, entre outros; que são usualmente denominados entulhos de obra, caliça ou metralha.

As resoluções CONAMA nº 307 (2002) e nº 431 (2011) classificam os resíduos de construção civil em quatro classes, que são:

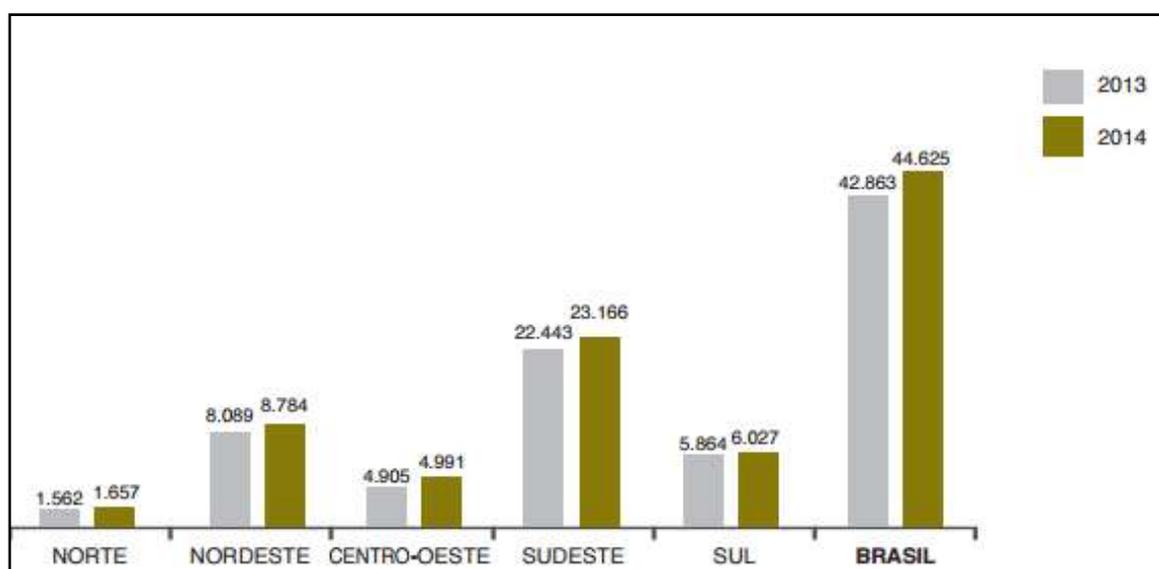
- Classe A – resíduos recicláveis ou reutilizáveis como os agregados: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, com inclusão de solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras 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: resíduos perigosos resultantes do processo de construção, 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.

No entanto, os resíduos provenientes de construção e demolição (RCD) são gerados durante todo o processo de construção, e conforme Ângulo (2005) são responsáveis por 50% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) que são produzidos pela população.

Pesquisas apontam que existe um aumento acelerado na geração de RCD, pois com o crescimento da população necessitam-se quantidades mais amplas de infraestruturas. Conforme a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2014) foram coletados pelos municípios brasileiros no ano de 2014 cerca de 45 milhões de toneladas de RCD, apresentando um aumento de 4,1% em relação ao ano anterior, como pode ser observado na Figura 3.1. No entanto, este aumento significativo que vem se observando requer atenção especial quanto ao destino final desses resíduos.

Figura 3. 1 - RCD totais coletados nas diferentes regiões do Brasil (toneladas/ano)



Fonte: ABRELPE, 2014

Como evidenciado em diversas pesquisas, as quantidades de RCD que são geradas nos mostram o quão importante é o gerenciamento desses resíduos, sendo que antes mesmo de iniciar uma obra é imprescindível que se estabeleça um plano de gerenciamento. Como citado por Keeler e Burke (2010) as boas práticas de construção necessitam que os empreiteiros elaborem planos de gerenciamento de resíduos da obra, que informem antes da construção

como eles pretendem lidar com os dejetos gerados durante o processo, sendo que devem ser descritos os tipos de materiais que os trabalhadores pretendem remover e aproveitar, bem como o tipo de coleta e o destino final destes resíduos.

Considerando que o destino inadequado dos RCD trazem vários problemas tanto ao meio ambiente como para a saúde dos seres vivos, o Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil (2011) aponta que a disposição inadequada desses resíduos afeta a paisagem local; tráfego de pessoas e veículos; provoca assoreamentos de rios, córregos e lagos; bem como o entupimento de drenagem urbana, resultando em enchentes; além de servirem como depósitos de outros tipos de resíduos não inertes, favorecendo o surgimento e aumento de doenças, trazendo riscos à saúde da população que está próxima.

Neste contexto, as reciclagens dos resíduos provenientes da construção civil são importantes alternativas, principalmente em relação aos aspectos ambientais, com objetivo de retornarem como materiais substituintes de matérias-primas que são continuamente extraídas do meio ambiente. Conforme Gayarre et al. e Ding et al. (2016) a reciclagem de RCD podem reduzir os aterros sanitários e a extração de recursos naturais, pois já foi confirmado por diversos estudos (Blengini, 2009; Blengini e Garbarino, 2010; Marzouk e Azab, 2014; Duan et al., 2015; Vitale et al., 2017).

### 3.1 COMPOSIÇÃO DOS RCD

Como a cadeia produtiva da construção civil desenvolve inúmeras atividades, os resíduos oriundos deste setor também são compostos por uma grande gama de diferentes materiais. Dentro deste contexto Zordan (2000) menciona que é bastante provável que os RCD sejam os mais heterogêneos entre os resíduos industriais e, no entanto, a sua composição química tem ligação direta com os materiais que os constituem, pois como sabemos, uma edificação é composta por diferentes tipos de materiais, e após a sua demolição observam-se essas características nos resíduos resultantes.

No entanto, Carneiro et al. (2000) afirmam que na composição dos RCD há predominância de uma fração mineral, mas que os entulhos também exibem características que são bastante peculiares, existindo uma grande diversidade de técnicas, matérias-primas e metodologias que são exploradas pela construção civil e que afetam as características apresentadas pelos resíduos gerados, principalmente no que se refere à composição e a quantidade. Deste modo, o nível de desenvolvimento da construção local reflete nas

características dos materiais de entulho, sendo assim, a caracterização dos resíduos está relacionada aos parâmetros da região de origem.

Como os materiais constituintes do concreto são basicamente matérias-primas, agregados miúdos e graúdos (pedra brita, areia, pedregulhos), aglomerantes (cimento, cal, adições minerais), água e aditivos, para Carneiro et al. (2000) tanto no Brasil como na Europa a constituição dos RCD é em torno de 90% frações de natureza mineral, como: concretos, rochas naturais, argamassas, solos, cerâmicas, entre outros.

Em relação à composição química desses resíduos, Piaia et al. (2013) afirmam que os óxidos que estão presentes nos RCD são compostos principalmente por: alumina, magnésio, óxido de cálcio e sílica, que correspondem a composição básica dos agregados que são utilizados para a produção de concreto, o que torna esses materiais viáveis para esta finalidade.

Dentro deste contexto, os RCD estão sendo cada vez mais empregados pelas indústrias da construção civil, como substituição parcial dos agregados naturais que compõem o concreto. Há alguns anos atrás os agregados eram considerados materiais inertes e de enchimento, dispostos na pasta de cimento, mas nos dias atuais percebe-se uma mudança relacionada a esta visão, em que se consideram os agregados não só do ponto de vista econômico, como também voltados à durabilidade e desempenho estrutural. No entanto, Pablos et al. (2012) apontam que existem riscos relacionados ao reaproveitamento dos RCD, por isso deve-se realizar uma avaliação criteriosa das suas propriedades e composições antes de serem reutilizados. Entretanto, esses pesquisadores descrevem que na realidade os agregados não podem ser considerados materiais totalmente inertes, já que suas características possuem grandes influências sobre as propriedades finais que são adquiridas pelo concreto.

O Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil (2011) apresenta a composição dos RCD de algumas cidades do Brasil, disposto na Tabela 3.1, ao analisá-la percebe-se que a soma dos percentuais de concreto, material cerâmico e argamassa, para cada uma das cidades apresentadas, perfaz mais que 60% do total de resíduos que são gerados, e esse indicativo mostra-se como ponto positivo em relação à possibilidade de reciclagem dos RCD, já que esses resíduos pertencem a Classe A, e são potencialmente recicláveis na forma de agregados.

Tabela 3. 1 - Composição do RCD de algumas cidades do Brasil

<b>Município</b>	<b>Argamassa (%)</b>	<b>Mat. Cer. (%)</b>	<b>Cerâmica polida (%)</b>	<b>Rochas e solos (%)</b>	<b>Outros (%)</b>
São Paulo <sup>a</sup> /SP	25,2	8,2	29,6	n.d	5
Porto Alegre <sup>b</sup> /RS	44,2	18,3	35,6	0,1	n.d
Ribeirão Preto <sup>c</sup> /SP	37,4	21,1	20,8	2,5	0,5
Salvador <sup>d</sup> /BA	53		9	5	6
Campina Grande <sup>e</sup> /PB	28	10	3	1	18
Maceió <sup>f</sup> /AL	27,82	18,65	48,15	n.d	2,32

n.d = não disponível

a) BRITO FILHO (1999)	d) QUADROS OLIVEIRA (2001)
b) LOVATO (2007)	e) NÓBREGA (2002)
c) ZORDAN (1997)	f) VIEIRA (2003)

Fonte: Adaptado do Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil, 2011

Com os avanços das tecnologias de reciclagem, os resíduos gerados pela construção civil que antes eram depositados em aterros, nos dias atuais a grande maioria tem outros destinos, como transformação em agregados, para serem substituídos na produção de concreto. No entanto, percebe-se o quanto as atitudes e conscientizações relacionadas ao descarte final destes resíduos estão sendo aprimoradas, e se cada vez mais as pessoas conseguirem agir desta forma, irão melhorar as condições do ambiente em relação à sustentabilidade.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RESULTANTES DE RCD

Os agregados são utilizados em quantidades significativas na composição do concreto, por isso é importante conhecer suas propriedades, pois de acordo com Levy (2001) concretos com agregados que possuem propriedades indesejáveis diminuem a resistência e interferem também na durabilidade e no desempenho estrutural.

No entanto, existem algumas características dos agregados que são de conhecimento imprescindível para a dosagem do concreto, como: massa unitária e específica; granulometria; absorção de água; porosidade; entre outras características que podem interferir nas propriedades do concreto. Essas características estão explicitadas a seguir:

a) Massa unitária e massa específica

Devido a maior porosidade dos agregados reciclados em relação aos naturais, na maioria das vezes os reciclados apresentam massa unitária e específica menores que os naturais. Para Neville (1997) a explicação da relação que existe entre a massa específica dos agregados e a porosidade, é devido a maior porosidade dos agregados de RCD, que é o principal responsável pela redução do valor de sua massa específica e, conseqüentemente da massa unitária. Conforme pesquisas realizadas por Lovato (2007) essa redução da massa unitária e específica dos agregados reciclados, deve-se principalmente à porosidade do material e a argamassa aderida às partículas, valores estes que são comprovados por meio dos resultados obtidos em seus estudos, com massa específica do agregado gráudo natural igual a  $2,85 \text{ kg/dm}^3$ , e massa específica do agregado gráudo reciclado variando de  $2,40 \text{ kg/dm}^3$  a  $2,58 \text{ kg/dm}^3$ .

b) Granulometria

Relacionando os agregados reciclados com os naturais, percebem-se diferenças significativas quanto à granulometria desses dois tipos de materiais. Conforme Banthia e Chan (2000) a tendência dos agregados reciclados, tanto gráudos como miúdos é que apresentem uma composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais, e conseqüentemente um módulo de finura um pouco maior. No entanto, Lovato (2007) que estudou frações mistas de RCD (cerâmica, argamassa e concreto), afirma que a composição granulométrica depende fortemente da origem do material e dos equipamentos que são utilizados para o seu processamento.

A granulometria dos agregados reciclados depende de inúmeros fatores, e Althemann (2002) cita como exemplo o tipo de resíduo que é processado e as propriedades dos britadores e do sistema de peneiramento que é utilizado pela usina. Desta forma, as curvas granulométricas obtidas para os agregados reciclados e naturais são bastante semelhantes, enquadrando-se assim, dentro das exigências da ABNT.

Portanto, para possibilitar propriedades satisfatórias por meio do emprego de agregados reciclados é necessário que se tenha atenção quanto à composição granulométrica dos mesmos, resultando desta forma no desempenho favorável e na redução dos custos dos concretos que serão produzidos.

c) Absorção de água

Dentre as diversas características que influenciam nas propriedades dos agregados reciclados em relação aos naturais, Etxeberria et al. (2007) citam que a absorção de água

possui forte influência, e este fator deve ser cuidadosamente observado durante a confecção de materiais que utilizam os agregados reciclados. Como afirma Leite (2001) os agregados naturais apresentam uma taxa de absorção de água que não apresenta quase nenhum tipo de influência nas misturas de concreto, já que esses agregados apresentam pouca ou nenhuma porosidade, mas em contrapartida, os agregados reciclados apresentam altos teores de absorção, o que torna essa influência uma grande preocupação.

A alta absorção de água demandada pelos RCD esta fortemente ligada à porosidade deste material, e, geralmente os concretos absorvem menos água que as argamassas, consequência da sua contribuição porosa. Os agregados com altas taxas de absorção de água segundo Tam et al. (2005) geralmente resultam em concretos com desempenhos inferiores, interferindo em propriedades como, durabilidade, resistência, deformação e retração.

Durante os estudos de concretos com o uso de agregados reciclados é importante levar em consideração a absorção de água do agregado, pois esta propriedade interfere gradativamente na relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ) final das misturas. No entanto, se não for considerado este fator, haverá uma redução da relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ), resultando em uma redução da trabalhabilidade e um concreto consideravelmente mais seco.

#### d) Porosidade

Como a porosidade é inversamente proporcional à resistência mecânica, Callister (2000) afirma que a correta determinação desta propriedade resulta em um melhor desempenho mecânico do material que está sendo estudado. Pode-se dizer que a porosidade dos agregados resultantes da britagem de concreto depende da relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ) que foi determinada no momento da confecção da pasta do concreto, pois sendo maior esta relação, maior será o número de poros.

Entre os diversos fatores que interferem nas propriedades do concreto, Ângulo (2005) classifica a porosidade dos agregados provenientes de RCD como a principal responsável pela influência da resistência à compressão dos concretos contendo este tipo de agregado, pois os agregados ocupam um volume considerável na constituição do concreto.

Portanto, como os agregados reciclados apresentam maior absorção de água que os naturais, é de extrema importância levar em consideração este fator no momento de produzir concretos com esses resíduos.

### 3.3 UTILIZAÇÃO DE RCD EM CONCRETOS

Estudos realizados com a utilização de agregados reciclados em concretos tem recebido bastante atenção, tanto pela grande quantidade e necessidade de reaproveitamento desses resíduos, como também pela sua reutilização como substituição de recursos naturais, tentando assim, diminuir a exploração e prejuízos causados ao meio ambiente.

De maneira geral, os agregados de RCD apresentam propriedades bastante variáveis, e como consequência o uso deste material em concretos proporciona grande variabilidade, principalmente devido à procedência e os tratamentos iniciais pelos quais eles devem ser submetidos. Por sua vez John e Agopyan (2011) afirmam que dependendo da procedência dos RCD, podem ocorrer contaminações que interferem tanto na qualidade técnica do produto final como também causando riscos ambientais.

Ao considerar as diferentes propriedades dos RCD em relação aos agregados naturais, é possível que concretos produzidos com agregados reciclados resultem em propriedades bastante semelhantes aos convencionais, mas isso depende da maneira como é preparado o agregado. Para Vieira e Dal Molin (2004) a utilização de agregados reciclados em concretos não afetam a sua resistência à compressão e a durabilidade, mas enfatizam a importância dos tratamentos deste material, desde o beneficiamento até o momento da utilização, fazendo com que suas propriedades sejam conhecidas e as limitações de seu uso diminuam.

Contudo, a utilização desse material como forma de substituição parcial do agregado natural para a produção de concreto exige amplos conhecimentos sobre as suas propriedades, bem como das consequências quando inserido ao novo material. Neste contexto, aprofundar os conhecimentos e explorar as propriedades resultantes deste concreto tanto no estado fresco como no endurecido são fatores básicos que orientam a utilização deste produto.

#### 3.3.1 Características do concreto com RCD em estado fresco

Pelo fato do agregado reciclado apresentar diferenças significativas em relação as suas propriedades quando comparado ao agregado natural, a utilização deste material como um dos componentes do concreto também implica em mudanças nos resultados, tanto no estado fresco do concreto como no estado endurecido. Desta forma, devido ao aumento da porosidade com a inserção do agregado reciclado, no estado fresco ocorrem alterações quanto à trabalhabilidade do concreto, ocasionando uma perda de abatimento com o passar do tempo.

Como afirma Leite (2001) uma das propriedades do concreto mais afetada pelo uso do agregado reciclado é a trabalhabilidade, ocasionada principalmente pela sua forma mais irregular, textura mais áspera e alta taxa de absorção.

Com o uso de agregados reciclado diminui-se o abatimento do concreto, e Ângulo (2005) aponta que isso ocorre no momento em que são empregados agregados mais densos, sendo que são ocasionadas poucas alterações na relação água/ materiais cimentícios ( $a/mc$ ) e no consumo de cimento, mas essas variações de abatimento ocorrem mesmo que se utilize aditivo e compensação de água. Por sua vez Cabral (2007) enfatiza que mantendo fixa a relação materiais secos/pasta para os dois tipos de misturas, a substituição do agregado natural pelo reciclado ocasiona uma perda de trabalhabilidade, que é evidenciado pelo autor como consequência da maior porosidade. Outro fator que também pode ser responsável por este acontecimento é o processo de britagem dos resíduos, pois com esses procedimentos tornam-se mais angulares, aumentando assim a fricção interna nos concretos com RCD, o que acaba por dificultar o deslizamento das partículas.

Uma sugestão citada por Poon et al. (2004) com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto que é alterada pelos agregados reciclados, seria a mudança na condição de umidade deste material antes dele ser inserido na mistura, pois realizando uma dosagem do concreto com agregado reciclado úmido iria minimizar o efeito de absorção dos agregados, tornando assim, os concretos mais trabalháveis.

Outra propriedade do concreto que também sofre modificação com a utilização do agregado reciclado é a massa específica. Nos estudos realizados por Poon e Chan (2006) percebe-se que, conforme o teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados aumenta, ocorre uma diminuição gradual da massa específica do concreto estudado. Silva et al. (2015) atribuem essa redução à maior porosidade do agregado reciclado, principalmente com teores crescentes de substituições. Por sua vez Mehta e Monteiro (2008) apontam que a massa específica do concreto fresco depende da massa específica e da porosidade do agregado, como também da textura, forma e tamanho das partículas.

### **3.3.2 Características do concreto com RCD em estado endurecido**

Como apresentado anteriormente, os agregados reciclados apresentam propriedades diferentes dos naturais, resultando desta forma em alterações nas características dos concretos quando esses são inseridos, algumas dessas alterações referem-se à resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios, módulo de elasticidade, entre outras influências.

a) Resistência à compressão

Diversos estudos realizados com a utilização de RCD em concretos confirmam a viabilidade de utilização deste material, mas, conforme Cabral (2010) deve-se levar em consideração a relação água/materiais cimentícios (a/mc), pois este é um dos principais fatores que interferem na resistência a compressão. No entanto, de acordo com Banthia e Chan (2000) as diferenças entre as propriedades dos concretos convencionais e dos concretos com a utilização de agregados reciclados é resultante de alguns fatores, como o teor de substituição deste agregado, da característica do concreto original, da natureza e nível de contaminantes, quantidade de finos e argamassa que está aderida ao agregado, entre outros fatores.

Por apresentar propriedades diferentes dos agregados naturais, os agregados provenientes de RCD possuem interferências nas propriedades dos materiais aos quais eles fazem parte, algumas delas benéficas e outras nem tanto, como por exemplo, quando adicionado ao concreto, muitas vezes reduz a resistência mecânica. No entanto, Mehta e Monteiro (2008) mencionam que a redução da resistência à compressão desses concretos, pode chegar a, pelo menos, dois terços da resistência atingida pelo concreto referência, ou seja, produzido com somente agregado natural. Desta forma, Leite (2001) afirma que a redução da resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados é devida à alta porosidade desses materiais, e também pela porosidade da zona de transição.

Ao utilizar resíduos mistos de RCD Carrijo (2005) separou estes resíduos em categorias, menos porosos e mais porosos, sendo os menos porosos as argamassas e concretos, e os mais porosos as cerâmicas. Desta forma constatou-se que ocorreu uma redução na resistência diretamente com o aumento da porosidade dos agregados e a relação água/materiais cimentícios (a/mc), e quando os agregados reciclados apresentaram uma massa específica reduzida. Nas pesquisas realizadas por Leite (2001) podem-se observar quais fatores possuem maior capacidade de interferência sob a propriedade de resistência à compressão dos concretos, que são citados pela autora em ordem de significância: relação água/materiais cimentícios (a/mc) (Lei de Abrams), teor de substituição do agregado graúdo, idade, teor de substituição do agregado miúdo, a interação teor de substituição do agregado graúdo x relação água/ cimentícios (a/mc), a interação idade x relação água/ materiais cimentícios (a/mc), a interação teor de substituição do agregado miúdo x idade e a interação teor de substituição do agregado graúdo x idade x relação água/ materiais cimentícios (a/mc).

Neste contexto, estudos realizados por Correia et al. (2006) inferem que para as substituições de 100% e 22% do agregado natural pelo reciclado, obteve-se redução da resistência à compressão de 45% e 22%, respectivamente, atribuindo esses resultados as propriedades dos agregados que foram utilizados. Já nas pesquisas realizadas por Rahal (2007) os concretos com substituições de 100% por agregados graúdos reciclados resultaram em uma redução da resistência à compressão de 9% em relação ao concreto referência, mas em outra pesquisa realizada pelo mesmo autor, ele obteve uma redução bem maior, chegando a 45%.

Troian (2010) constatou em seus estudos que os concretos com 100% de agregados reciclados apresentaram uma redução de resistência de 60% em relação ao concreto convencional, sendo que os concretos com substituições de 25% de agregado natural pelo reciclado atingiram 85% da resistência dos concretos referência. Para Senthamarai et al. (2005) a viabilidade da substituição de agregados britados graúdos por agregados reciclados cerâmicos foi analisado por meio de seis misturas de concreto com diferentes relações água/materiais cimentícios (0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 e 0.60), sendo que as condições dos agregados na mistura foram saturados superfície seca (SSS). A resistência à compressão variou de 30 a 50 MPa, não sendo significativamente diferente do concreto convencional.

Mesmo apresentando redução na resistência à compressão, os concretos produzidos com agregados reciclados podem ter sua resistência aumentada através de alguns procedimentos realizados durante a preparação da mistura de concreto. Entretanto, Araújo (2015) aponta que a menor resistência obtida pelos concretos com RCD é consequência da sua maior porosidade em relação aos agregados convencionais, mas com a redução da relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ), esta resistência pode ser aumentada, pois se reduz a porosidade da pasta de cimento.

#### b) Absorção de água e índice de vazios

A absorção de água enquadra-se entre os diferentes fatores que alteram as propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados. Segundo Leite (2001) os agregados naturais apresentam uma taxa de absorção de água que quase não interfere nas misturas de concreto, visto que esses agregados possuem pouca, ou nenhuma porosidade. Mas com o emprego de agregados reciclados na produção de concretos, necessita-se que se dê bastante atenção quanto às influências, sendo que este material apresenta valores de absorção elevados em relação aos agregados que são normalmente utilizados. Conforme Sani et al. (2005) os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam uma alta porcentagem

de meso e macro poros, resultando em uma porosidade com maior facilidade de absorção de água e lixiviação em relação aos concretos convencionais.

Inúmeras pesquisas apontam que concretos constituídos parcialmente por agregados reciclado possuem maior absorção e índices de vazios em relação aos concretos convencionais, atribuindo-se esta característica ao aumento da relação água/ materiais cimentícios ( $a/mc$ ), redução da massa específica, permeabilidade e diferentes composições dos agregados reciclados (CARRIJO, 2005; FONSECA, 2006; LOVATO, 2007; TENÓRIO, 2007).

Lovato (2007) afirma que a porosidade dos RCD condiciona a capacidade de absorção destes, e conseqüentemente, quando inseridos em uma nova matriz, interfere na capacidade de absorção do novo material, como por exemplo, quando substituído parcialmente por agregado natural na composição do concreto. Portanto, quanto maior a porcentagem de agregados de RCD substituídos na composição do concreto, maior será a taxa de absorção deste material, bem como, quanto maior for à relação água/ materiais cimentícios ( $a/mc$ ) da matriz, maior será a quantidade de poros com capacidade de absorver água da pasta, estabelecendo uma condição de elevada taxa de absorção do concreto.

O aumento da porosidade do concreto tem relação direta com o volume de agregado reciclado que é substituído pelo natural. Cabral (2007) afirma que a substituição dos agregados graúdos naturais pelos agregados reciclados, faz com que ocorra um aumento no volume de poros capilares, o que não depende do tipo de agregado reciclado que foi empregado. O autor também constatou que a substituição dos agregados graúdos tem maior influência sob o volume de poros e índices de vazios, do que as substituições feitas somente com agregados miúdos, pois quando se trata de 100% de substituição, o acréscimo de absorção fica em torno de 40% para agregados resultantes de concreto. Dentro do mesmo contexto, Gómez-Soberón (2002) menciona que as substituições dos agregados naturais pelos reciclados aumentam a porosidade do concreto, chegando a 11,7% e a absorção de água em até 14,3% para os máximos teores de substituições.

De acordo com Poon et al. (2004) a diminuição da trabalhabilidade apresenta-se de maneira significativa quando se utiliza 100% de agregados reciclados secos ao ar ou em estufa, mas o uso de RCD em condições intermediárias podem minimizar os efeitos da alta absorção desses agregados.

c) Módulo de elasticidade

Conforme Mehta e Monteiro (2014) o módulo de elasticidade ou também conhecido como módulo de Young, é considerado um parâmetro mecânico que permite medir a rigidez de um material, que pode estar associado com propriedades mecânicas, tais com: tensão de escoamento, tensão de ruptura, propagação de trinca, etc.

Considerando que as características elásticas de qualquer material são resultantes da medição da sua rigidez, Mehta e Monteiro (2008) mencionam que mesmo o concreto não apresentando comportamentos lineares, necessita-se estimar o seu módulo de elasticidade, que nada mais é que, a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite adotado, sendo possível através deste resultado conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, permitindo assim, o cálculo das tensões de projeto sob carga.

Ângulo (2005) atribui a diminuição do módulo de deformação do concreto aos agregados de RCD, pois contêm poros e microfissuras resultantes da britagem, e quanto maior o teor de substituição dos agregados naturais por estes, menor é o módulo de deformação alcançado. Por sua vez Leite (2001) afirma que os fatores de grande influência sob o módulo de elasticidade, são: relação água/ materiais cimentícios ( $a/mc$ ), teor de substituição do agregado graúdo e a interação teor de substituição do agregado graúdo x teor de substituição do agregado miúdo; sendo os dois primeiros os fatores de maior influência.

É de extrema valia estudos voltados ao módulo de elasticidade de concretos com RCD, pois se percebe por meio de diversas pesquisas que esta propriedade está relacionada principalmente ao teor de agregado graúdo que se utiliza na mistura de concreto, sendo que quando se substitui agregados naturais por reciclados obtêm-se uma redução no módulo de elasticidade. Ao substituir 100% de agregado natural por reciclado, Xião et al. (2005) obtiveram uma redução do módulo de elasticidade em 45%, concluindo assim que, quanto maior o teor de agregado reciclado menor é o módulo de elasticidade. Já nas pesquisas de Poon et al. (2006) substituições de 20% de agregado cerâmico resultaram na redução de 10% do módulo de elasticidade.

Portanto, os diferentes métodos adotados para a determinação do módulo de elasticidade do concreto acabam dificultando uma comparação entre pesquisas de diferentes autores. Os resultados que foram encontrados nas pesquisas estudadas são consequências não apenas da composição dos agregados de RCD, mas também dos equipamentos utilizados para a britagem, realização ou não da pré-molhagem, percentuais de RCD substituídos, relação água/ materiais cimentícios ( $a/mc$ ), tipo de cimento, utilização ou não de aditivos, entre outros diversos fatores que podem intervir nesta propriedade.

### 3.4 DURABILIDADE DE CONCRETOS COM RCD

A durabilidade pode ser entendida como a capacidade do concreto em resistir qualquer tipo de processo de deterioração, tanto por agentes químicos, abrasão, ou intempéries. Desta forma, a deterioração do concreto ocorre pela ação de fatores externos ou até mesmo internos ao próprio material, podendo ser exemplificado através da diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratada.

No início dos estudos relacionados à durabilidade, a maioria teve influência devido aos aspectos econômicos dos produtos, e também pela necessidade de controle de manutenção. Mas no momento em que se deu maior atenção aos fatores voltados ao desenvolvimento sustentável, esta primeira visão ganhou nova forma, pois o aumento da vida útil de uma estrutura influi diretamente sob a diminuição do impacto ambiental, acarretando assim em novas pesquisas nesta área.

De acordo com Calado et al. (2015) o concreto é um material que em estruturas geralmente encontra-se associado com as armaduras, vindo a formar o conhecido concreto armado ou concreto protendido, desta maneira a estrutura interage com o meio na qual ela se encontra, e os materiais que a constituem ficam sujeitos a desenvolverem reações que podem vir a causar alterações em suas condições iniciais, fazendo com que os materiais constituintes desta estrutura deixem de exercer a função para as quais foram projetados, o que acaba por comprometer a durabilidade da estrutura. O estudo da durabilidade das estruturas de concreto é para Helene (2001) algo que aumenta os conhecimentos relacionados às ações de líquidos e gases que são considerados danosos aos poros de alguns materiais, como o concreto, permitindo assim, a avaliação da vida útil quantificada em anos e não mais em termos qualitativos.

Pode-se afirmar que os conceitos de durabilidade, vida útil e desempenho são aspectos interligados. Para Isaia (2001) o conceito de durabilidade dos materiais está relacionado com a capacidade do mesmo conservar-se em determinado estado, mantendo a mesma qualidade durante um tempo estimado, ou seja, pode-se dizer que é a capacidade do material resistir à deterioração ou degradação. No entanto, o autor enfatiza que este último conceito está intimamente integrado com o desempenho, que é denominado o comportamento de um produto ou serviço que está sendo utilizado com atendimento pleno as exigências dos usuários. Por sua vez, John (2001) acredita que a durabilidade é uma questão baseada mais em conhecimento do que em recursos, sendo que a vida útil pode ser aumentada, sem, contudo,

aumentar o impacto ambiental na fase de produção. Desta forma, prever a vida útil de um material, ou conjunto deles, requer o conhecimento estimado da mesma para os componentes e critérios adicionais do projeto.

Conforme a norma NBR 15575 (2013) o conceito de durabilidade é considerado como a capacidade de uma edificação ou de seus sistemas em desempenhar suas funções, durante um período de tempo estabelecido e sob as condições de uso e manutenção que são especificadas. Para a mesma norma, a vida útil é classificada como uma medida temporal para a qual um edifício e/ou seus elementos conseguem cumprir com as funções para os quais foram projetados e construídos, considerando a correta execução de manutenções e periodicidade que são estabelecidos pelo Manual de Uso, Operação e Manutenção.

Como estudado em itens anteriores, quando produzidos concretos com RCD ocorre à alteração de algumas propriedades do mesmo em comparação ao concreto convencional, sendo assim, os cuidados com os fatores relacionados à durabilidade deste concreto devem ser aumentados. Grande parte das pesquisas com RCD demonstram a viabilidade técnica deste material quando introduzido ao concreto frente às solicitações mecânicas, sendo um fator importante que se deve considerar quando da criação de um novo material. No entanto, encontram-se poucas bibliografias que englobam a durabilidade, vida útil e desempenho de concretos com substituições parciais de agregado natural por RCD.

Diversos autores, como Ângulo (2000); Levy (2001); Leite (2001); Sani et al (2005); Carrijo (2005); Fonseca (2006); Lovato (2007); Tenório (2007) entre outros, afirmam que a utilização de agregados de RCD alteram as propriedades do concreto, e uma delas é a absorção, pois os concretos produzidos com RCD apresentam maior porosidade que os convencionais, sendo desta forma, mais suscetíveis a ação de agentes deletérios. Pois esses concretos permitem a passagem de água e gás com maior facilidade para o seu interior, devido ao aumento da quantidade de poros, que são responsáveis pela absorção de água, como essa absorção ocorre de forma mais rápida, a passagem dos gases também, proporcionando a formação de reações químicas no interior do concreto, e assim, vindo a interferir nas características do aço que está associado ao concreto, facilitando a corrosão.

Nos estudos de Cabral et al. (2010) os autores investigam a durabilidade de concretos com a utilização de RCD em relação a absorção, obtendo resultados que indicam um material mais poroso e menos durável. Sendo que os resultados demonstram que substituições de até 50% de agregado natural por RCD apresentam-se semelhantes ao concreto convencional. Da mesma forma, Olorunsogo e Padayachee (2002) afirmam que a durabilidade do concreto com RCD diminui proporcionalmente com o aumento da quantidade de substituição. Para Mehta e

Monteiro (2008) não há dúvidas que a principal propriedade frente à durabilidade de concretos tanto com agregados naturais como reciclados é a permeabilidade, sendo que as degradações químicas, como a carbonatação, ataques por cloretos e sulfatos, entre outros; são considerados proporcionais à permeabilidade do concreto.

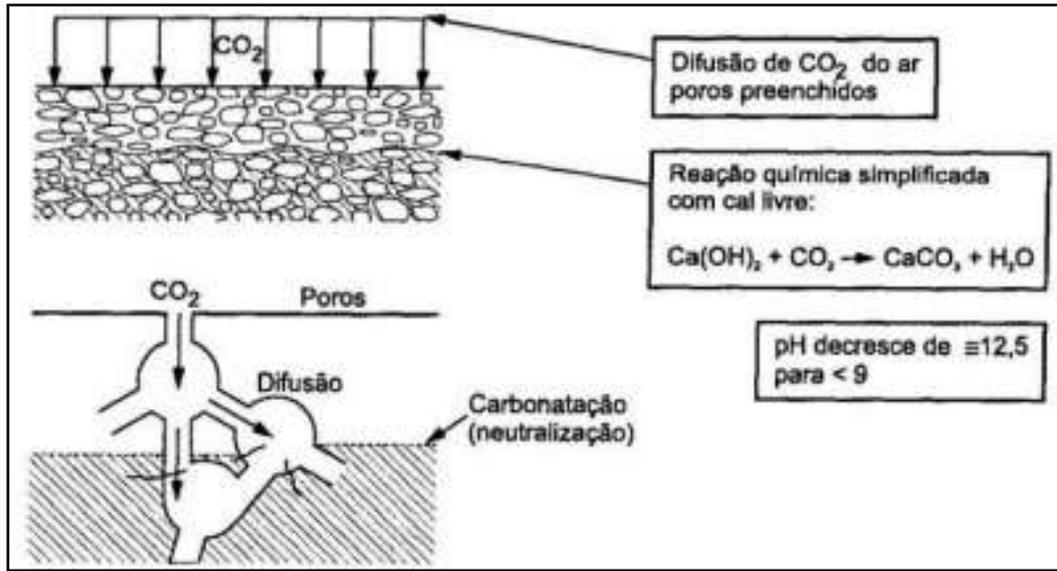
### 3.4.1 Carbonatação

A construção de obras de engenharia de grande porte deve-se principalmente a combinação do aço e do concreto, pois permite suportar grandes esforços, proporcionando maior segurança e estabilidade em relação aos sistemas construídos. Considerando a resistência a ação de solicitações um dos fatores mais importantes, sem, contudo, deixar de considerar a durabilidade deste sistema como um todo, pois se constitui em uma das propriedades do concreto que necessita de grande atenção. No entanto, como existem inúmeras propriedades do concreto que interferem em sua durabilidade, pode-se citar a rede de poros, que possui a capacidade de torna-los mais ou menos suscetíveis à ação de agentes agressivos, entre esses agentes destaca-se o  $\text{CO}_2$ , principal responsável pelo fenômeno de carbonatação em concretos.

Desta forma, de acordo com Nepomuceno (2005) a penetração de agentes agressivos ao concreto está relacionada com a qualidade da camada de cobrimento, expressa pelo tipo de aglomerante e porosidade, caracterizando-se como um dos principais parâmetros para a previsão da vida útil.

O fenômeno da carbonatação ocasiona ao concreto vários efeitos, entre eles Mehta e Monteiro (2008) consideram como principal, a redução da alcalinidade do concreto, pois como o seu pH inicialmente apresenta-se acima de 12,5, diminui para valores menores que 8,5, momento em que o hidróxido de cálcio transforma-se em carbonato de cálcio. Através da Figura 3.2 pode-se observar a esquematização do processo de carbonatação, que inicia na superfície e divide o processo em duas zonas, uma com pH maior que 12 e a outra menor que 9, e ainda apresenta uma zona intermediária que é denominada zona de transição.

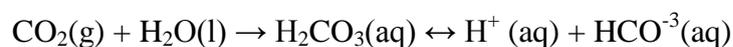
Figura 3. 2 - Esquemática do processo de carbonatação



Fonte: Backer, 1988 adaptado por Cascudo, 2005

Dentro deste contexto, essa drástica redução da alcalidade do concreto, ocasionada por meio do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  na solução dos poros tem como consequência, se atingida a armadura, a sua despassivação, deixando o aço sem proteção e propício à corrosão, sendo que na medida em que ocorre o consumo do  $\text{Ca(OH)}_2$  livre e de outros álcalis os compostos de cálcio aumentam, e tem-se o avanço da frente de carbonatação. No entanto, Pauletti (2009) enfatiza que a redução da alcalinidade não afeta o concreto em si, mas considerando o concreto armado, pode tornar-se uma situação crítica em relação a corrosão da armadura, no momento em que algumas condições como a presença de água, diferença de potencial, acesso ao hidrogênio forem reunidas, que são fatores normalmente presentes em estruturas de concreto armado.

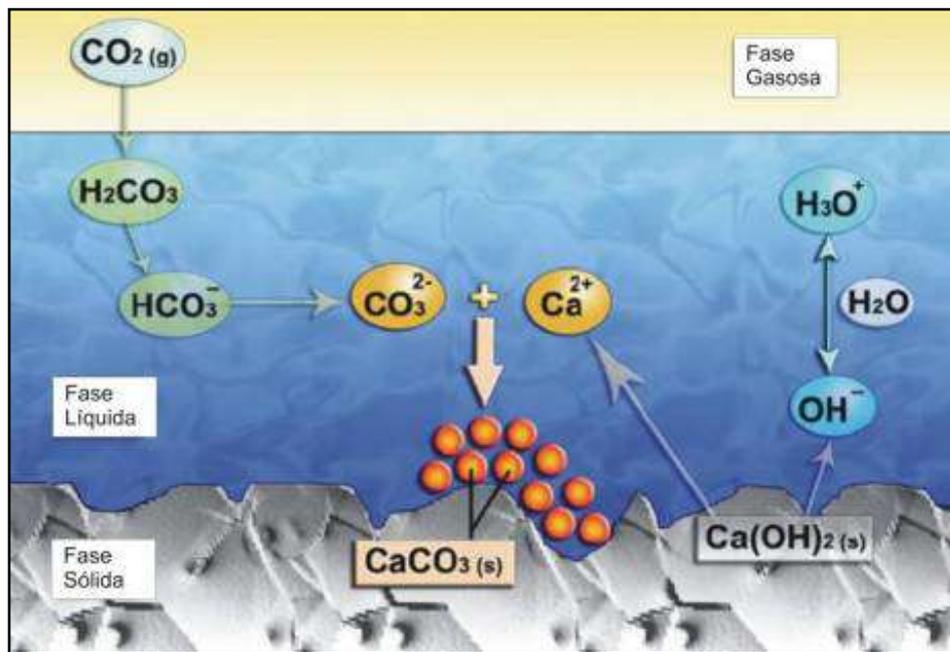
Nos estudos de Thiery et al. (2007) os autores explicam o processo de carbonatação conforme a Equação 1, em que esse fenômeno ocorre através da difusão do gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) na fase aquosa dos poros de concreto, no momento em que possui um ambiente parcialmente saturado. Desta maneira, a dissolução do  $\text{CO}_2$  forma o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) em meio aquoso, e sua dissociação traz como resultado os íons bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), como representado a seguir.



(Equação 1)

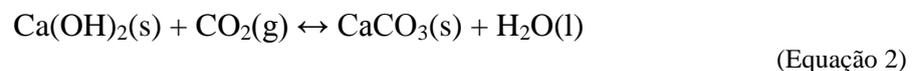
Neste momento e nas mesmas condições ambientais está presente nos poros do concreto o produto da hidratação do cimento, o  $\text{Ca(OH)}_2$ . No entanto, em meio aquoso ocorre à dissolução do hidróxido de cálcio, liberando os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  (hidroxila). Por meio da combinação desses dois íons forma-se o composto  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio). Essas etapas podem ser melhor compreendidas através da Figura 3.3.

Figura 3.3 - Reações no poro do concreto



Fonte: Thiery et al., 2007

Thiery et al. (2007) ainda explicam que essas reações intermediárias podem ser sintetizadas em uma única reação química, como representada na Equação 2.



No entanto, Cascudo e Carasek (2011) enfatizam que além da formação do carbonato de cálcio, a carbonatação pode vir a ocorrer com os demais produtos da pasta de cimento hidratada, como C-S-H, NaOH e KOH, sendo mais relevante a formação a partir do hidróxido de cálcio, por causa da rapidez com que o mesmo reage com o  $\text{CO}_2$ .

### 3.4.1.2 Carbonatação em concreto com RCD

Visto em itens anteriores, por meio de inúmeras pesquisas constatou-se que os agregados reciclados possuem maior porosidade e absorção em relação aos agregados naturais, resultando assim, em alterações nas propriedades do concreto quando a ele inseridos.

Pesquisas realizadas por Sentena (2010) com a utilização de RCD em concretos, concluíram que os concretos com ARC (agregado reciclado de concreto) de porosidade maior ou igual ( $f_c = 37$  e  $50$  MPa) à porosidade da nova matriz ( $f_c = 32,5$  MPa), resultaram em uma profundidade de carbonatação nas idades de 147 dias bastante semelhante ao concreto convencional. No entanto o autor menciona que em concretos com RCD de maior porosidade (18 MPa) o resultado alcançado foi diferente, apresentando profundidade de carbonatação superior ao concreto convencional de aproximadamente 50%.

Dentro do mesmo contexto, Levy (2001) estudou agregados reciclados de concretos com 20 e 30 MPa, e obteve menor profundidade de carbonatação em concretos com RCD em relação ao concreto convencional, no momento em que foi realizada uma mistura de concreto de 40 MPa, na idade de 182 dias e concentração de  $CO_2$  de 12%, sem a realização de pré-condicionamento. No entanto o autor afirma que o percentual de substituição do agregado reciclado pelo natural e a origem dos mesmos, teve pouca interferência nos resultados de carbonatação, considerando que este acontecimento se deve a formação de uma camada de blindagem entre a pasta e o agregado reciclado (devido as suas micro fissuras, material cimentante e superfície rugosa). Quanto aos teores de substituições, o autor afirma que quanto maior o teor de substituição, menor será o desempenho do concreto frente à durabilidade, recomendando assim baixos teores de substituições, em no máximo 20%.

Da mesma forma, estudos realizados por Werle (2010) relacionados à carbonatação em concretos com RCD, constataram que à medida que é aumentada a resistência do agregado reciclado de concreto, diminui-se a velocidade de carbonatação em relação ao concreto referência. Vale frisar que este comportamento está diretamente relacionado com a porosidade do agregado reciclado.

A carbonatação acelerada também foi estudada por Sagoe Crentsil et al. (2001), analisada em câmara de carbonatação com concentração de 4% de  $CO_2$ , em que concretos com 100% de agregados reciclados resultaram em maiores profundidades de carbonatação em relação ao concreto convencional. Já em estudos realizados pelos mesmos autores, com a utilização de agregados naturais e reciclados, e adição de 5% de escória, alcançaram valores

de carbonatação inferiores aos concretos de referência.

Como evidenciado por diversos autores, a carbonatação em concretos com RCD tende a ser maior do que em concretos com agregados naturais. Estudos realizados por Katz (2003) também comprovam essa afirmação, em que obteve profundidades de carbonatação de 1,3 a 2,5 vezes maior em concreto com RCD em comparação aos concretos convencionais. Ao mesmo tempo, esta tendência não pode ser generalizada, pois o fenômeno de carbonatação depende de inúmeros fatores, como também os agregados residuais apresentam diferentes propriedades, o que vem a dificultar comparações entre os diversos estudos já realizados.

#### *3.4.1.3 Mecanismos que influenciam a carbonatação em concretos com RCD*

Existem vários fatores que influenciam na velocidade de carbonatação em concretos, os quais estão diretamente relacionados às condições de exposição e as características apresentadas pelo concreto. Pode-se afirmar que o processo de carbonatação é diretamente dependente da concentração de  $\text{CO}_2$  do ambiente, umidade do ar e do concreto, temperatura, tipo de cimento e adições, tipo de agregado, relação água/materiais cimentícios, condições de cura, entre outros parâmetros que podem causar interferências.

Como mencionado anteriormente, os agregados reciclados provocam alterações nas propriedades do concreto, tornando-se um fator importante a ser estudado para o melhor entendimento do fenômeno da carbonatação.

A seguir são especificados alguns mecanismos que influenciam o processo de carbonatação em concretos.

##### a) Concentração de $\text{CO}_2$

Como a penetração de  $\text{CO}_2$  nos poros de concreto ocorre por difusão, por meio de um gradiente de concentração, quanto maior for a concentração de  $\text{CO}_2$  no meio externo, maior será o gradiente, e conseqüentemente a penetração nos poros será aumentada. Como por exemplo, ensaios de carbonatação acelerada em que a concentração de  $\text{CO}_2$  é bem mais elevada que no ambiente natural, irá resultar em profundidades de carbonatação maiores em menor tempo.

Desta forma, a taxa de concentração de  $\text{CO}_2$  a que o concreto está exposto controla a profundidade de carbonatação, pois conforme Houst et al. (2002) pode-se descrever primeiramente o processo de carbonatação como sendo a difusão de  $\text{CO}_2$  por meio dos poros em uma certa umidade, mas as reações de  $\text{CO}_2$  dissolvido ocorrem com maior rapidez

em relação a difusão, sendo os métodos de carbonatação acelerada meios para se obter resultados em menor tempo, já que quando o material está exposto ao ambiente, as concentrações de CO<sub>2</sub> são mais baixas, demorando assim para realizar as análises dos resultados.

Como as diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> no meio interferem na difusão da carbonatação por meio dos poros de concreto, Saetta e Vitaliani (2004) apresentam através da Tabela 3.2 a variação de CO<sub>2</sub> para diferentes condições ambientais.

Tabela 3. 2 - Diferentes concentração de CO<sub>2</sub>

<b>Ambiente</b>	<b>Concentração de CO<sub>2</sub> (% vol.)</b>
Zona rural	0,015
Centro da cidade	0,036
Zona Industrial	0,045
Estábulo arejado	0,046
Estábulo	0,075
Exaustão de veículo motorizado	16,69
Respiração Humana	3,62

Fonte: Adaptado de Saetta e Vitaliani, 2004

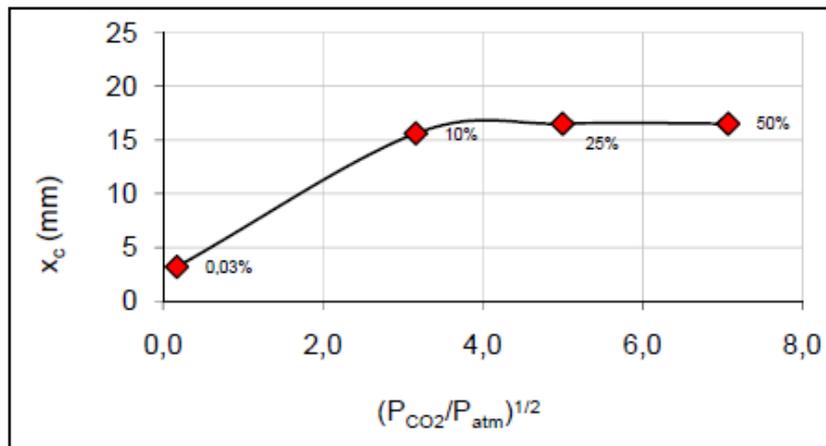
No entanto, com o intuito de conseguir rapidamente resultados sobre a carbonatação em concreto, parte-se para os ensaios de carbonatação acelerada, que são métodos estudados por uma ampla gama de pesquisadores, consistindo na submissão de amostras de concreto em câmara climatizada, que tem o controle da umidade, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>, sendo os principais fatores que interferem na evolução desse processo.

Para os ensaios de carbonatação acelerada muitos pesquisadores utilizam percentuais de CO<sub>2</sub> iguais ou menores que 10%. Pesquisas realizadas por Sánjuan et al. (2001) e Castelotte et al. (2009) indicam uma aceleração da frente de carbonatação diretamente proporcional a concentração de CO<sub>2</sub>. Já em outros estudos realizados por Rougeau (1997) e Hyvert (2009) a profundidade de carbonatação tem aumento quanto maior a concentração de CO<sub>2</sub> até certo limite.

Estudos sobre carbonatação acelerada realizados por grande parte dos pesquisadores (ATIS, 2003; BARDAR et al. 2014; LAMBERTI, 2015) utilizam concentrações de CO<sub>2</sub> em torno de 5%, que corresponde a aproximadamente 5 vezes maior a concentração dos ambientes urbanos, e em relação aos ambientes rurais cerca de 167 vezes. Sendo que existem casos em que foram utilizadas concentrações de 10% até 50%, em pesquisas de Hivert (2009),

em que o autor constatou que as profundidades de carbonatação aumentam consideravelmente quando expostas a concentrações de 10%, sendo que a partir deste valor o aumento é bem menor, e entre concentrações de 25 e 50% não se evidenciou diferenças, como pode ser analisado na Figura 3.4.

Figura 3. 4 - Carbonatação em argamassas expostas a diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>



Fonte: Hivert, 2009

Por sua vez Pauletti (2009) questiona por que nem sempre a carbonatação é maior quanto maior a concentração de CO<sub>2</sub>. Mas não houve respostas que explicassem esse acontecimento, sendo que em suas pesquisas obteve aumento da profundidade de carbonatação até concentrações em torno de 20%, e ainda enfatiza que a determinação do percentual ideal de CO<sub>2</sub> deve ser através de comparações entre ensaios acelerados e naturais, no que se refere ao perfil das curvas e diferenças na microestrutura do concreto analisado.

No entanto, a carência de padronização e inexistência de normas para auxiliar o ensaio de carbonatação, acaba tornando difícil a realização de comparações entre resultados de diferentes autores.

#### b) Umidade relativa

A umidade relativa pode ser considerada como a umidade em que o corpo-de-prova encontra-se em equilíbrio, dependendo das condições ambientais em que o ensaio está sendo analisado. De acordo com Neville (2013) a difusão do CO<sub>2</sub> ocorre sem dificuldades quando os poros do concreto encontram-se secos, sendo que quando eles apresentam-se saturados de água, a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> é bem menor. Mas por outro ângulo, Figueiredo (2005) aponta que quando os poros encontram-se secos mesmo sendo facilitada a difusão do CO<sub>2</sub> para o interior do material, não ocorre carbonatação, pois não há água para reagir com o gás.

Já quando os poros estão saturados, mesmo a velocidade de difusão sendo baixa, a carbonatação ocorre, porém de forma bastante lenta.

Sendo assim, para ocorrer o processo de carbonatação necessita-se que os poros estejam parcialmente saturados, permitindo a difusão do  $\text{CO}_2$  e tendo água para ocorrer às reações, esses fatores são especificados através da Figura 3.5 que apresenta os graus de saturação dos poros de concreto.

Figura 3. 5a – Poros totalmente secos

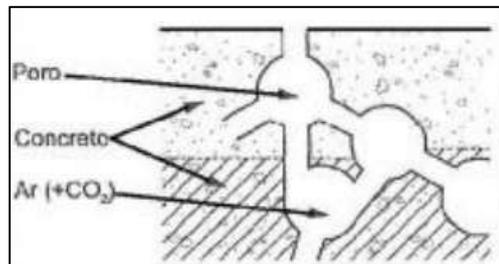


Figura 3.5b – Poros totalmente saturados de água

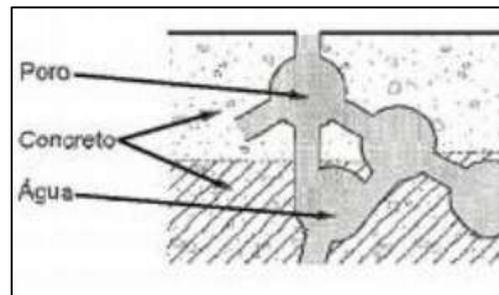
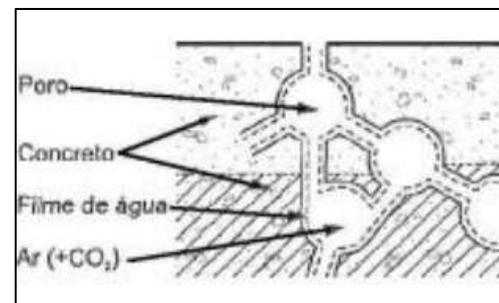


Figura 3.5c – Poros parcialmente saturados de água



Fonte: Bakker, 1988 adaptado por Possan, 2010

Para as reações de carbonatação, ainda não existe definição da umidade relativa ótima, e sim de um intervalo, que de acordo com Neville (1997) varia entre 50 e 70%. Concomitantemente, Bary e Sallier (2004) afirmam que as mais altas velocidades de

carbonatação são apresentadas quando se tem umidade entre 40 e 80%.

No entanto, quando a carbonatação ocorre de forma natural, sem ser submetida à câmara de carbonatação, Helene (1993) aponta que a umidade é bastante influenciada pela presença de chuvas, não podendo ser controlada, e a penetração do  $\text{CO}_2$  é dificultada, pois os poros capilares são fechados. Pode-se afirmar que os concretos que se encontram protegidos da chuva, mas que estejam expostos a umidade apresentam maiores profundidades de carbonatação do que os concretos expostos constantemente a chuva.

#### c) Temperatura

Mesmo apresentando pouca influência no processo de carbonatação, a temperatura é um fator que não pode ser desconsiderado, pois é bastante importante na determinação da taxa de corrosão das armaduras. Conforme Andrade (1992) o incremento da temperatura faz com que aumente a velocidade das reações e a mobilidade dos íons, sendo que a sua redução pode vir a provocar a condensação, resultando na produção de incrementos locais onde exista umidade.

Considerando a baixa influência da temperatura sobre a carbonatação, Kulakowski (2002) afirma que não há interferências significativas na velocidade do fenômeno quando as temperaturas estão na faixa de 20 a 40 °C. Da mesma forma, Neville (1997) afirma que essa ocorrência é devido às reações ainda serem controladas pela difusão.

Quanto maior for à temperatura, maior será a intensidade das reações químicas em relação ao processo de carbonatação. Para Tuuti (1982) a temperatura é um fator bastante importante, pois o seu aumento interfere na mobilidade dos íons, que também sofrem aumento, o que acaba por facilitar o transporte de substâncias e acelerar as reações. Por sua vez, Maekawa et al. (2003) afirmam que pequenas variações de temperatura não interferem de forma significativa na velocidade do processo de carbonatação.

#### d) Tipo de cimento e adições

O tipo de cimento utilizado para a produção de concreto determina a quantidade de compostos alcalinos disponíveis para reagir com o  $\text{CO}_2$ . Para Helene (1993) a reserva alcalina é o teor de álcalis que estão disponíveis para a carbonatação, e quanto maior é a concentração de hidróxido de cálcio na solução dos poros, menor será a velocidade de penetração do  $\text{CO}_2$ , sendo assim, para ocorrer aumento da profundidade de carbonatação é necessária a diminuição do pH dos poros e reações de todo o teor de hidróxido disponível, para permanecer penetrando e precipitar o carbonato de cálcio. Ainda, de acordo com seus estudos, o autor afirma que cimentos com maiores teores de  $\text{C}_3\text{S}$  (silicato tricálcico),

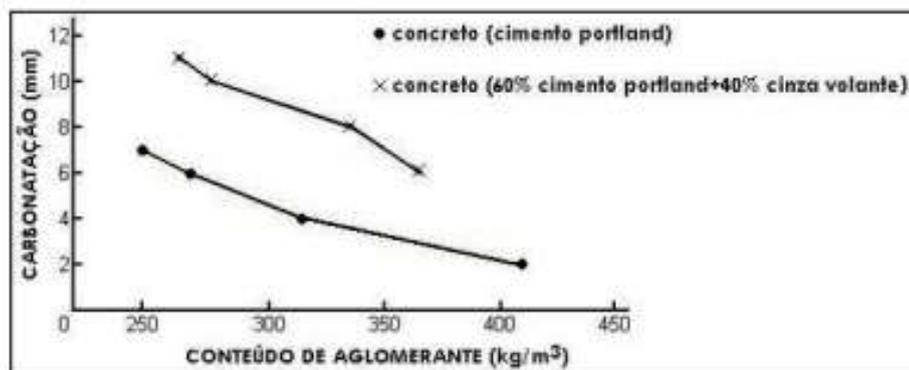
apresentam profundidades de carbonatação menores em relação aos demais cimentos, pois liberam mais  $\text{Ca(OH)}_2$ , mesmo mantendo-se o traço e exposição ao ambiente.

Quanto aos cimentos com adições, Figueiredo (1993) afirma que a bibliografia é praticamente unânime quando conclui que cimentos com o uso de adições resultam em concretos com menor desempenho quanto à carbonatação quando comparados com concretos convencionais. No entanto, o tipo de cimento influencia o processo de carbonatação devido a sua composição química e finura dos grãos, sendo que quanto mais fino e puro ele se apresentar, ocorre maior produção de álcalis, proporcionando melhores condições para as reações com o  $\text{CO}_2$ .

Relacionando às adições minerais ao cimento e o fenômeno de carbonatação, Possan (2004) afirma que as adições aceleram esse processo, pois há um acréscimo da profundidade de carbonatação quando são utilizadas substituições com teores maiores, em torno de 50% (cinza volante ou de casca de arroz) e maior relação água/materiais cimentícios (a/mc). No entanto, a autora frisa que a influência da finura dos grãos das adições é menor em relação à carbonatação quando comparado com os tipos de adições, teores de substituições e relação água/materiais cimentícios (a/mc).

Nos estudos de Figueiredo (1993) é apresentada a utilização de 40% de cinza volante como substituição parcial do cimento Portland na produção do concreto e observa-se que houve aumento da profundidade de carbonatação, também proporcionalmente com a menor quantidade de cimento ou cimento cinza, por metro cúbico, Figura 3.6.

Figura 3. 6 – Cimento convencional e com adições – carbonatação



Fonte: Ho e Lewis, 1987 adaptada por Figueiredo, 1993

No entanto, quanto mais finos são os grãos da adição, maior é a sua reatividade, fazendo com que reaja com mais agilidade com  $\text{Ca(OH)}_2$ , diminuindo a reserva alcalina e propiciando a carbonatação. Desta forma, Venquiarutto et al. (2002) encontraram em seus

estudos maiores profundidades de carbonatação quando adicionadas adições de maior finura ao concreto.

e) Tipo de agregado

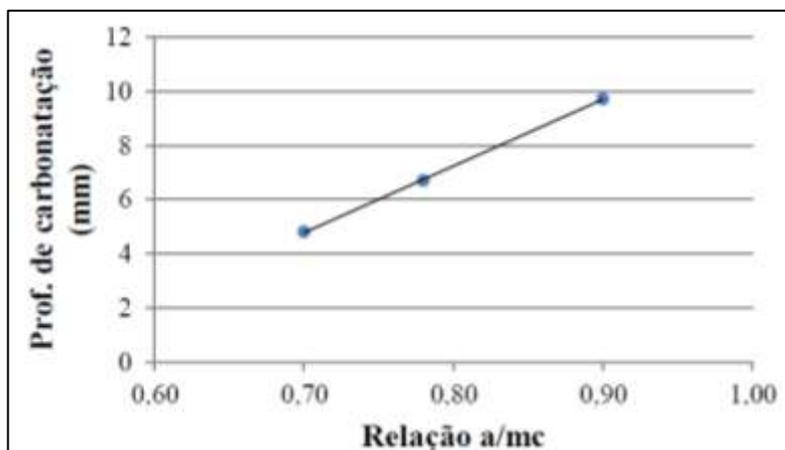
Grande parte das pesquisas realizadas até o momento, não apresentam preocupações com os agregados quando se estuda a carbonatação, pois em relação a este fenômeno os mesmos são considerados materiais inertes. Mas quando se estuda concretos com substituições de agregados naturais por reciclados, muitos autores citam que esses últimos apresentam maior porosidade quando comparados com os convencionais. Entretanto, espera-se que nesses concretos a velocidade de carbonatação seja aumentada.

No entanto, pesquisas realizadas por Masce et al. (2003) apresentam maiores profundidades de carbonatação em concretos produzidos com agregados reciclados quando comparados com os naturais. Ao explicar este acontecimento, Otsuki e Miyazato (2000) o atribuem a antiga zona de transição da argamassa que fica aderida aos agregados reciclados, tornando-os mais permeáveis em comparação com os concretos produzidos com agregados naturais.

f) Relação água/materiais cimentícios (a/mc)

A relação água/materiais cimentícios é diretamente proporcional à profundidade de carbonatação, ou seja, quanto maior a relação utilizada maior a profundidade de carbonatação para a mesma idade de ensaio, tanto natural como acelerado. Da mesma forma, Helene et al. (1999) apresenta por meio da Figura 3.7, o gráfico que mostra a relação água/materiais cimentícios (a/mc) com a profundidade de carbonatação.

Figura 3. 7- Profundidade de carbonatação e relação a/mc



Fonte: Helene et al., 1999

Esse acontecimento pode ser explicado de diferentes formas, para Castro (2003) é

devido à facilidade que o  $\text{CO}_2$  penetra na estrutura física da pasta, e quanto maior a sua interconectividade, maior será a velocidade de difusão do  $\text{CO}_2$  para o interior do concreto, resultando assim, em uma maior profundidade de carbonatação.

Ao estudar concretos com adições de cinza de casca de arroz (CCA), cinza volante (CV) e micro sílica (MS), em misturas binárias e ternárias, com substituições entre 10 e 50%, Isaia (1995) constatou que se aumentando a relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ) também se aumentou a profundidade de carbonatação dos concretos analisados, sendo que esses resultados foram atribuídos ao aumento da porosidade e permeabilidade do concreto, pois ele fica mais suscetível à difusão do  $\text{CO}_2$  atmosférico.

#### g) Condições de cura

Assim como os fatores citados anteriormente influenciam o processo de carbonatação, as condições de cura também apresentam interferências na evolução deste fenômeno, pois tanto as condições de cura como o tempo, possuem influências na microestrutura do concreto, e conseqüentemente na profundidade de carbonatação do mesmo. A cura desempenha um papel muito importante, e a atenção para esse fator deve ser redobrada quando são utilizadas misturas na composição do concreto, como pozolanas, escórias, resíduos de construção e demolição, entre outros. Pois uma cura realizada de forma cuidadosa e por um período de tempo maior, irá melhorar o desenvolvimento das reações pozolânicas e o refinamento dos poros da estrutura, reduzindo a permeabilidade, e, no entanto, compensando o efeito negativo do consumo de hidróxido de cálcio.

Existem inúmeros estudos que relacionam de maneira direta as condições de cura com a resistência ao processo de carbonatação, em que se utilizam diferentes períodos de cura e de processos. Conforme Figueiredo et al. (1993) quanto maior for o tempo de cura do concreto, maior será a hidratação do cimento, resultando em uma menor porosidade e permeabilidade, que terá como consequência menor evolução do fenômeno de carbonatação.

Para tentar comparar as diferenças de carbonatação entre concretos curados em cura úmida e seca, Atis (2002) realizou cura úmida de  $UR= 100\%$  e cura seca de  $UR= 65\%$ , e constatou que em cura úmida a profundidade de carbonatação resulta em 35 e 70% do valor, em comparação com a cura seca, variando com as diferentes misturas. Também através desses estudos, o autor concluiu que quanto maior o tempo de cura, menor foi à profundidade de carbonatação atingida.

De acordo com estudos realizados, percebe-se que através das curas submersas ou úmidas, ocorre melhor hidratação do cimento e conseqüentemente maior fechamento dos poros, contribuindo assim para uma menor evolução do processo de carbonatação.



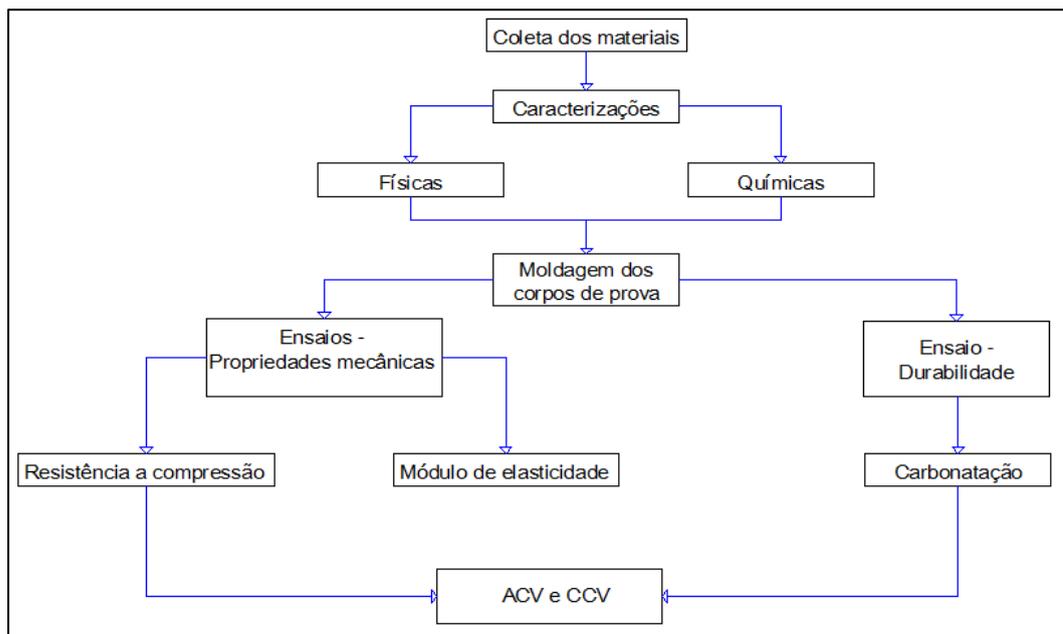
## CAPITULO IV

### 4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão expostas as etapas para a realização do estudo proposto, tendo em vista que, em relação aos procedimentos, esta pesquisa se classifica como quantitativa e qualitativa. No que se refere à quantitativa, será desenvolvida por meio de ensaios laboratoriais, quantificação de custos e fluxos de materiais; e em relação à qualitativa e quantitativa, através da análise dos impactos ambientais.

Os estudos englobam o ciclo de vida completo da unidade funcional estabelecida – pilar de concreto armado - em que primeiramente serão expostos os objetivos, juntamente com as características desta unidade funcional. Em seguida serão apresentados os materiais e suas respectivas caracterizações para os ensaios experimentais em laboratório, bem como a dosagem do concreto e os traços unitários resultantes, e ainda será realizada uma análise sobre o ciclo de vida do pilar em estudo frente à carbonatação, possibilitando assim, a realização dos estudos sobre a Avaliação do Ciclo de Vida e do Custo. Para a melhor visualização, na Figura 4.1 está representado o fluxograma dessas etapas.

Figura 4. 1 - Etapas dos procedimentos para a realização do estudo



Fonte: Autoria própria

## 4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Nesta etapa, estão dispostas as variáveis da pesquisa, que são as independentes, intervenientes e dependentes.

### 4.1.2 Variáveis independentes

Estão relacionadas com os materiais que compõem o concreto, e que tem a capacidade de determinar o seu grau de compacidade, que são:

- Relação água/materiais cimentícios: inicialmente foram adotadas as relações 0,35; 0,475 e 0,65 para todas as misturas;
- Idade de ensaio: resistência à compressão aos 28 e 91 dias; módulo de elasticidade aos 28 dias, e carbonatação acelerada em 4, 8, 12 e 16 semanas de exposição em câmara climatizada.

### 4.1.3 Variáveis intervenientes

São as variáveis que possuem a capacidade de modificar as variáveis independentes, e consequentemente influenciam nos resultados das variáveis dependentes, que são:

- Porcentagem de substituição de pozolana: foram adotadas as substituições parciais do cimento CPV-ARI, em massa, por 25% de CCA;
- Porcentagem de substituição do RCD: fixou-se o percentual de 15% e 30% de substituição do agregado graúdo natural pelo RCD.
- Tipo de cimento: CPIV e CPV – ARI.

### 4.1.4 Variáveis dependentes

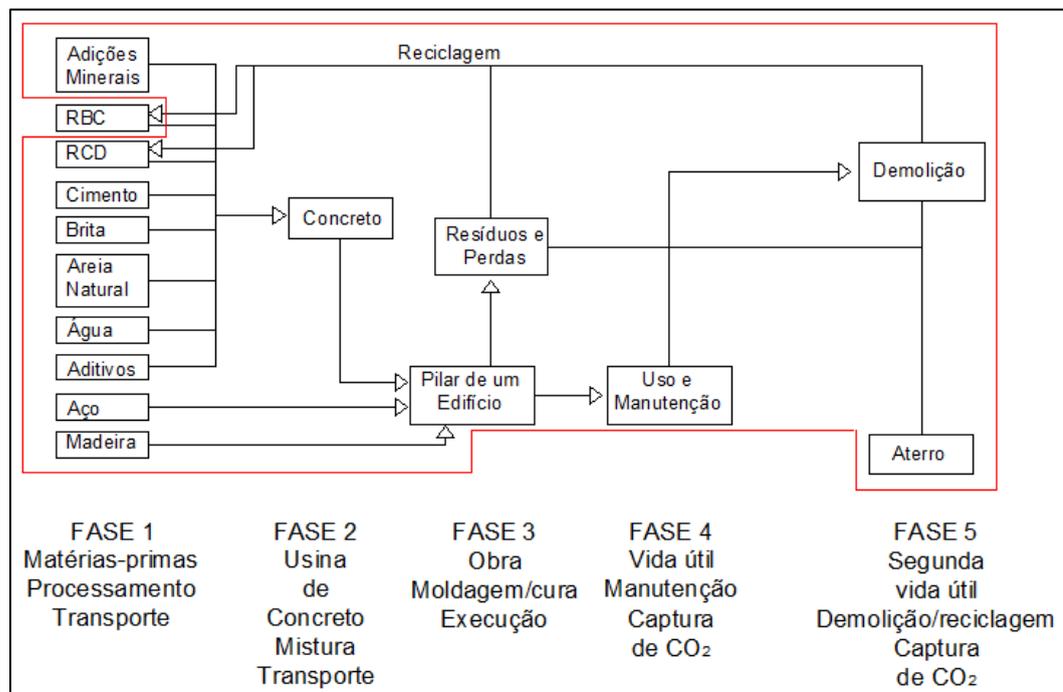
Dependem diretamente das variáveis independentes, interferindo nos resultados do concreto, quanto à resistência à compressão axial; módulo de elasticidade e profundidade de carbonatação.

## 4.2 OBJETIVO E ESCOPO

A unidade funcional em estudo (pilar de concreto armado fictício) foi analisada como se estivesse no centro do primeiro andar de uma edificação com oito pavimentos, sendo o primeiro em pilotis, supondo-se que o pilar estaria suportando as cargas provenientes da construção, estando coberto e exposto ao ar. Partindo destes fatores, a pesquisa buscou comparar e avaliar aspectos ambientais e econômicos entre as diferentes alternativas de pilar que foram estudadas.

A Figura 4.2 foi elaborada de acordo com a *Fédération Internationale du Béton - FIB* (2012), para a melhor visualização da delimitação do estudo da unidade funcional, em que o sistema está apresentado em cinco fases do ciclo de vida do concreto, que são: matérias-primas, usina de concreto, obra, vida útil e segunda vida. O presente estudo engloba todas as fases, em que as unidades que compõem o escopo estão demarcadas pela linha vermelha. As siglas RBC e RCD representam respectivamente, resíduos de blocos de concreto e resíduos de construção e demolição.

Figura 4. 2 - Sistema que engloba a unidade funcional em estudo – PILAR



Observação: o RBC está sendo estudado em outra pesquisa de dissertação de mestrado.

Fonte: *Fédération Internationale du Béton - FIB* 2012

No entanto para possibilitar a comparação, foram realizadas diferentes misturas de concreto, compostas por cimento Portland CP IV e CPV-ARI e; pozolana (CCA); agregado miúdo (areia natural); agregado graúdo (brita e resíduos de construção e demolição (RCD); água e aditivo químico redutor de água; adotada resistência característica  $f_{ck} = 25$  MPa e vida útil mínima de 50 ano e máxima 150 anos. Por se tratar de um trabalho exploratório não foi seu objetivo realizar a análise de sensibilidade quanto ao grau de incerteza devido a hipóteses genéricas de módulos e escolhas metodológicas.

#### 4.2.1 Unidade funcional

O dimensionamento da unidade funcional foi realizado de acordo com a norma NBR 6118: 2014. Por estar situado em região urbana, definiu-se a classe de agressividade ambiental I - fraca e cobrimento de 25mm. Com o auxílio do software Eberick V6 (ALTOQI, 2013) foram determinados os esforços solicitantes, Tabela 4.1. No Apêndice A está representado o detalhamento desse dimensionamento.

Tabela 4. 1 - Esforços solicitantes e definições de projeto

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Esforço normal de cálculo (Nd)	1.200 kN
Resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ )	25 MPa
Momento fletor no eixo vertical y da seção do pilar ( $M_{yd}$ )	55 kN.m
Momento fletor no eixo horizontal x da seção do pilar ( $M_{xd}$ )	78 kN.m
Cobrimento da armadura	25 mm
Altura do pilar	2,75 m

Fonte: Autoria própria

O dimensionamento foi realizado com o auxílio do software Oblíqua 1.0 da UFPR (CESEC, 2014), em que os dados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2 - Consumo de materiais e dimensionamento do pilar

<b>Materiais</b>	<b>Pilar com <math>f_{ck} = 25\text{MPa}</math></b>
Seção transversal (cmxcm)	25x50
Volume de concreto ( $\text{m}^3$ )	0,344
Área de forma ( $\text{m}^2$ )	4,125
Espaçamento de estribos	$\Phi 5\text{mm}$ c/ 12cm
Peso dos Estribos (kg)	4,43
Armadura longitudinal (un.)	10 $\Phi 10\text{mm}$
Peso das barras longitudinais (kg)	16,97
Peso total de aço (kg)	21,40

Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Caracterização dos materiais utilizados

Este item apresenta os materiais que foram utilizados na pesquisa, bem como os ensaios relacionados com as propriedades físicas e químicas de cada um deles.

##### 4.2.2.1 Materiais cimentícios

Foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI da marca Itambé, produzido em território nacional, conforme a norma NBR 5733: 1991 e o cimento CP IV de fabricação Votoran, de acordo com a norma NBR 5736:1999. Como substituição parcial do cimento utilizou-se cinza de casca de arroz (CCA) proveniente da região de Santa Maria – RS, em que a mesma foi queimada a céu aberto (sem controle de temperatura) e em seguida moída durante 1 hora em moinho de bolas. Para estes materiais foram realizados os seguintes ensaios de caracterização:

- a) Composição química: perda ao fogo,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ , S,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e Início de pega (Associação Brasileira de Cimento Portland);
- b) Massa específica absoluta, através da utilização do frasco volumétrico de Le Chatelier, (NBR NM 23, 2001);
- c) Granulometria por difração a laser (ABCP);
- d) Determinação da finura (NBR 11579 - 2013);
- e) Determinação da água da pasta de consistência normal (NBR NM 43 - 2003);
- f) Tempo de início e fim de pega utilizando o aparelho de Vicat (NBR NM 65 - 2003);
- g) Resistência à compressão axial da argamassa normal a 3, 7 e 28 dias (NBR 7215-1997).

Na Tabela 4.3 estão representadas as características físicas dos materiais cimentícios, e a composição química pode ser observada na Tabela 4.4, em que percebe-se que o resultado do cimento CPV em relação ao resíduo insolúvel, encontra-se em desconformidade com a norma, bem como o resultado do cimento CPIV em relação ao anidrido carbônico.

Tabela 4. 3 - Características físicas dos materiais cimentícios

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>IDADE - DIAS</b>	<b>CPV-ARI</b>	<b>CPIV</b>	<b>CCA</b>
Índice de Finura #0,075 mm (% retida)		0,02	0,2	4,97
Área específica BET (m <sup>2</sup> /g)		5,96	-	18,71
Consistência normal (%)		29,1	30	-
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,14	2,70	2,09
Argamassa normal - Resistência à compressão axial (MPa)	3	38,1	21,0	-
	7	38,6	25,3	-
	28	50	33,1	-
Início de pega (min)		154	224	-
Fim de pega (min)		191	265	-
Dimensão média das partículas (µm)		8,5	7,27	15,54
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 10% das partículas (µm)		0,83	0,93	5,19
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 90% das partículas (µm)		22,38	21,60	54,14

Fonte: Autoria própria

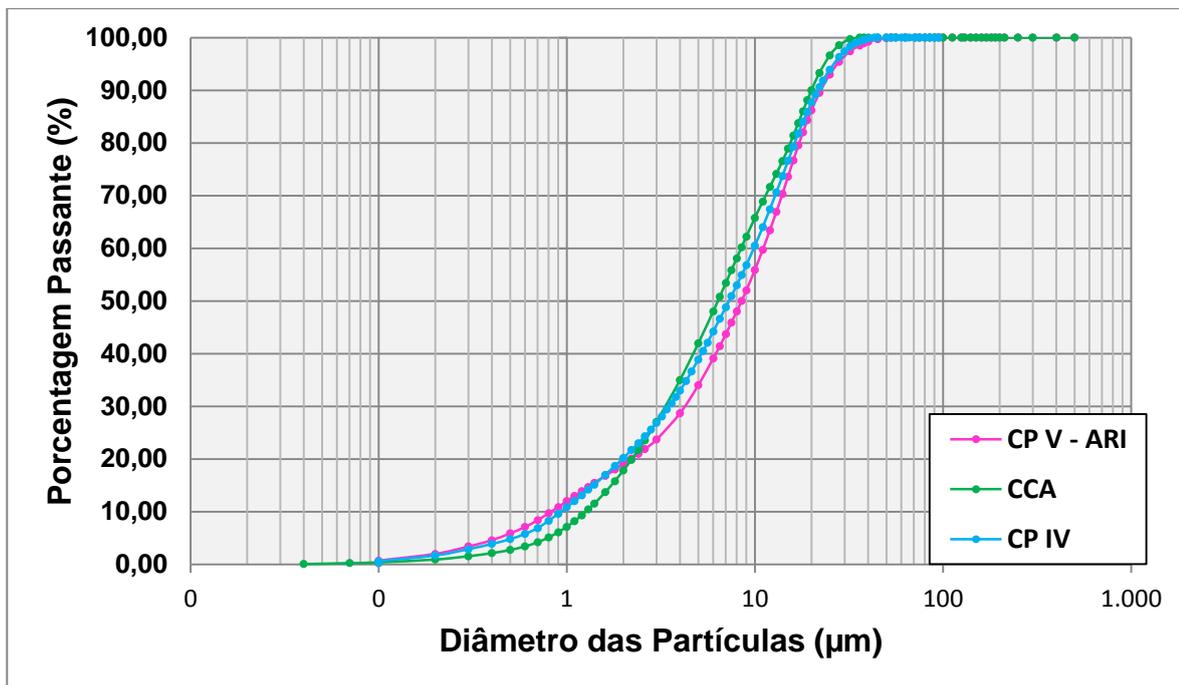
Tabela 4. 4 - Composição química dos materiais cimentícios

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	CPV-ARI	Limites (NBR 5733/91)	CPIV	Limites (NBR 5736/99)	CCA
Perda ao fogo - <b>PF</b>	3,08	≤ 4,5%	7,00	≤ 4,5%	0,25
Dióxido de Silício total - <b>SiO<sub>2</sub></b>	18,81	-	32,61	-	94,84
Óxido de Alumínio - <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,75	-	8,79	-	0,39
Óxido de Ferro - <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,68	-	4,34	-	0,54
Óxido de Cálcio total - <b>CaO</b>	60,88	-	38,12	-	1,32
Óxido de Magnésio - <b>MgO</b>	5,22	≤ 6,5%	5,04	≤ 6,5%	0,40
Anidrido sulfúrico - <b>SO<sub>3</sub></b>	2,28	≤ 4,5%	1,97	≤ 4,0%	0,01
Óxido de sódio - <b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,18	-	0,20	-	0,11
Óxido de Potássio - <b>K<sub>2</sub>O</b>	0,89	-	1,39	-	1,45
Óxido de Titânio - <b>TiO<sub>2</sub></b>	0,3	-	0,41	-	-
Pentóxido de Fósforo - <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,16	-	0,10	-	-
Óxido de Manganês - <b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,04	-	0,10	-	-
Óxido de Cálcio livre - <b>CaO</b>	1,17	-	1,93	-	-
Resíduo insolúvel - <b>RI</b>	1,19	≤ 1,0%	34,27	-	-
Anidrido Carbônico - <b>CO<sub>2</sub></b>	2,27	≤ 3,0%	4,89	≤ 3,0%	-

Fonte: Adaptado do Relatório de Ensaios da ABCP, 2013

As curvas granulométricas dos materiais cimentícios podem ser observadas na Figura 4.3, obtidas através dos ensaios de granulometria por difração a laser, realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland e Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Em que se pode perceber que as curvas dos dois cimentos e da cinza de casca de arroz são bastante próximas.

Figura 4. 3 - Curva granulométrica dos materiais cimentícios



Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Cimento Portland e Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS, 2013.

#### 4.2.2.2 Agregados

Foram utilizados agregados graúdos e miúdos. Como agregado graúdo empregou-se brita com fração retida entre as peneiras 19 e 4,8mm, proveniente da cidade de Itaara – RS, e como substituição parcial deste agregado utilizou-se resíduos de construção e demolição (RCD), provenientes da empresa GR2 de Santa Maria – RS. Como agregado miúdo foi utilizado areia com granulometria entre 4,8 e 0,15mm do rio Vacacaí de Santa Maria – RS. Os ensaios realizados para caracterização desses materiais estão apresentados a seguir:

- Massa específica e aparente do agregado miúdo (NM 52:2009);
- Massa específica e aparente do agregado graúdo e absorção de água (NM 53:2009);
- Massa unitária e do volume de vazios de agregados (NM 45:2006);
- Índice de forma do agregado graúdo (NBR 7809:2008);
- Composição granulométrica (NM 248:2003);

Na Tabela 4.5 estão representadas as características físicas dos agregados - areia, brita e RCD.

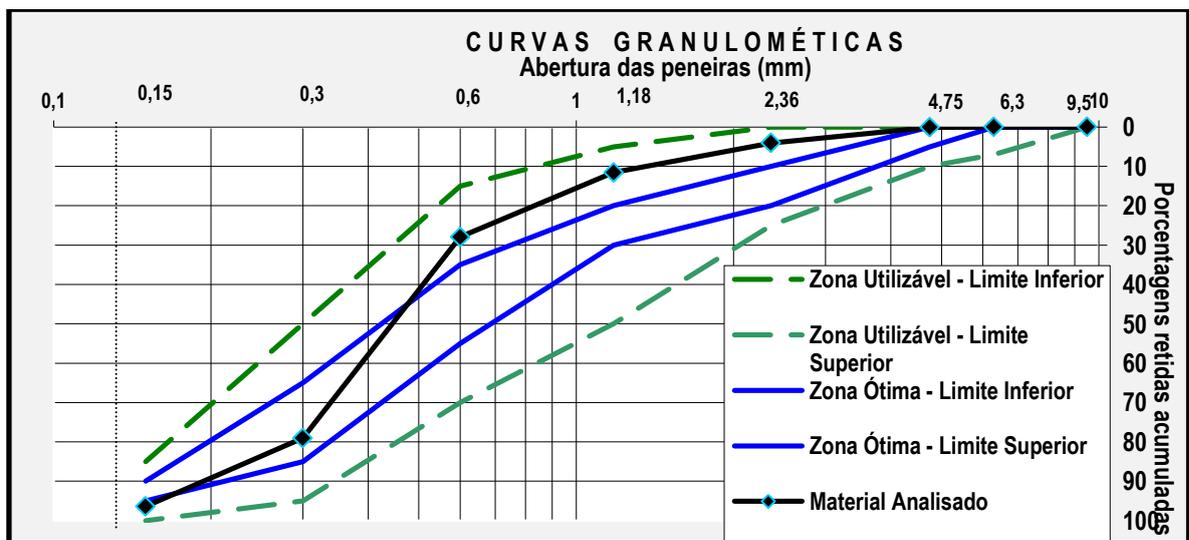
Tabela 4. 5 - Caracterização física dos agregados

<b>Características Físicas</b>	<b>Areia</b>	<b>Brita</b>	<b>RCD</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,49	1,98
Massa unitária, (g/cm <sup>3</sup> )	1,57	1,36	1,02
Módulo de finura	2,19	6,96	6,35
D. máx. característico (mm)	2,36	19	19
Absorção do agregado (%)	0,33	2,18	9,52
Índice de forma	-	1,59	3,24

Fonte: Autoria própria

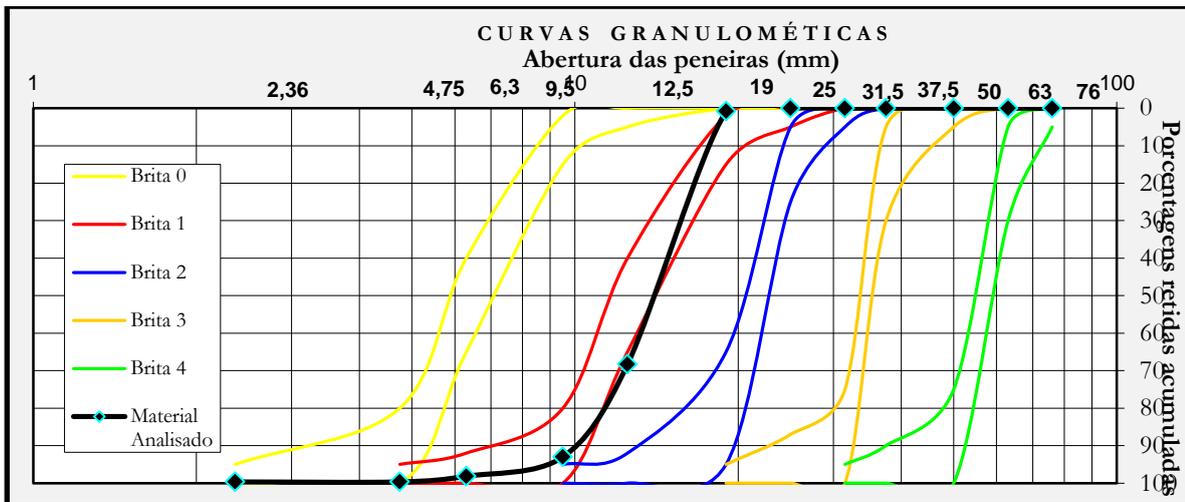
Na Figura 4.4 pode ser observada a curva granulométrica do agregado miúdo, em que a curva na cor preta está representando a granulometria da areia ensaiada, sendo que as linhas contínuas indicam a zona ótima do agregado miúdo, e as linhas tracejadas externas representam os limites estabelecidos pela norma NBR 7211:2009. No entanto esta areia está parcialmente dentro da zona ótima e o restante na zona utilizável, satisfazendo os limites estabelecidos. Na Figura 4.5 está representada também na cor preta a curva granulométrica do agregado graúdo, também em conformidade com a norma NBR 7211: 2009, podendo ser classificada como brita 1. Já na Figura 4.6 pode ser analisada a curva granulométrica do RCD, sendo bastante semelhante com a curva granulométrica do agregado graúdo.

Figura 4. 4 - Curva granulométrica do agregado miúdo



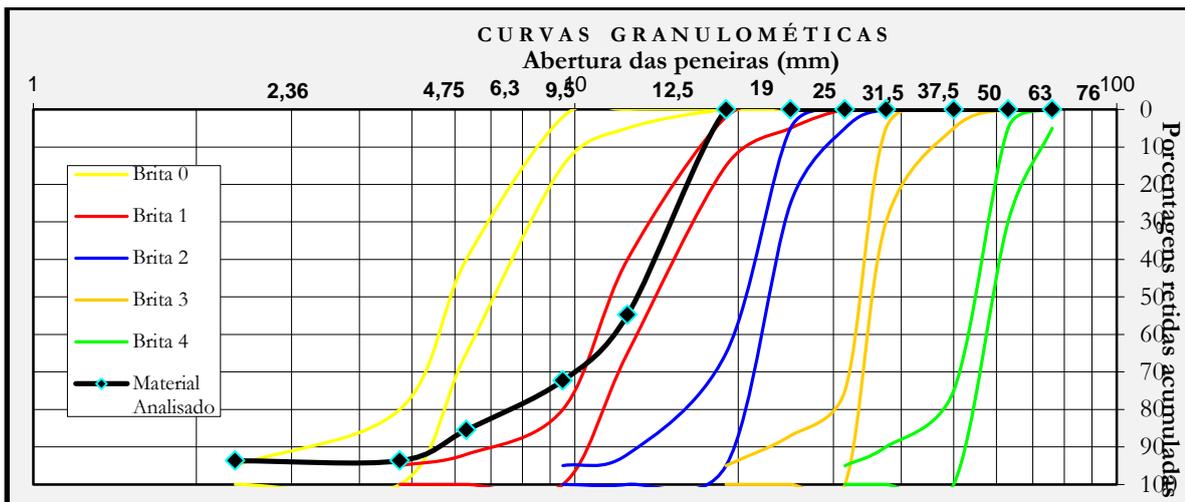
Fonte: Autoria própria

Figura 4. 5 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autoria própria

Figura 4. 6 – Curva granulométrica do RCD



Fonte: Autoria própria

Os RCD foram primeiramente classificados antes de serem britados, em que separou-se os materiais que poderiam substituir o agregado graúdo, como pedaços de concreto, argamassa, cerâmica, sendo que os demais como madeira, plásticos, gesso, papéis, entre outros, foram descartados, na Tabela 4.6 estão as porcentagens de cada um desses materiais. O emprego dos RCD ao concreto deu-se com superfície saturada seca (SSS), devido a sua alta capacidade de absorção de água.

Tabela 4. 6 - Classificação dos RCD em porcentagem

<b>Classificação dos RCD (%)</b>		
<b>Concreto, argamassa e cerâmica</b>	<b>Piso Cerâmico</b>	<b>Outros</b>
92,82	3,44	3,74

Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2.3 Aditivo químico redutor de água

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto foi utilizado aditivo hiperplastificante MasterGlenium54, fornecido pela BASF The Chemical Company, em que os dados técnicos estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4. 7 - Característica do aditivo redutor de água

<b>Característica do aditivo</b>	<b>Hiperplastificante</b>
Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	1,10
pH	6
Percentual de sólidos (%)	40
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido branco turvo

Fonte: BASF, 2014

### 4.2.3 Dosagem do Concreto

O estudo de dosagem do concreto foi realizado de acordo com o método proposto por Helene e Terzian (1992), em que foi fixada resistência característica para o concreto de 25 MPa.

Devido a diminuição da resistência à compressão axial do concreto obtida em ensaios preliminares pelos traços com substituições de 15 e 30% de RCD empregaram-se pozolanas para tentar compensar esta queda, e também além das moldagens com o cimento CP V- ARI foram produzidos concretos com o cimento CP IV – pozolânico afim de comparação de resultados.

Para obter a curva de Abrams foram adotadas três relações água/materiais cimentícios (a/mc), 0,35, 0,475 e 0,65, abatimento do tronco de cone de 100±20 mm, e ainda para melhorar a consistência do concreto utilizou-se aditivo redutor de água em algumas misturas.

O teor de água/materiais secos foi estabelecido em  $H$  (kg/kg)= 8,22% e argamassa seca  $\alpha$  (kg/kg) = 0,5, em que esses dados foram fixados para todos os traços preliminares para possibilitar a realização dos cálculos dos traços unitários de concreto para cada relação água/materiais cimentícios (a/mc). De acordo com a NBR 12655: 2015 adotou-se desvio padrão de  $S_d= 4$  MPa, determinando assim, para a resistência característica estabelecida ( $f_{ck} = 25$ MPa), a resistência aos 28 dias de  $f_{28}= 31,6$  MPa.

Para possibilitar o traçado da curva de Abrams, foram ensaiados os traços de concreto para as três relações água/materiais cimentícios (a/mc) diferentes, através da moldagem de 4 corpos de prova cilíndricos de 10x20mm para cada um dos traços de concreto. Após a desmoldagem os corpos de prova foram levados à câmara úmida para serem curados durante 28 dias, conforme prescreve a norma NBR 5738: 2016. Depois do período de cura os mesmos foram retificados e submetidos aos ensaios de resistências à compressão axial, de acordo com a norma NBR 5739: 2007.

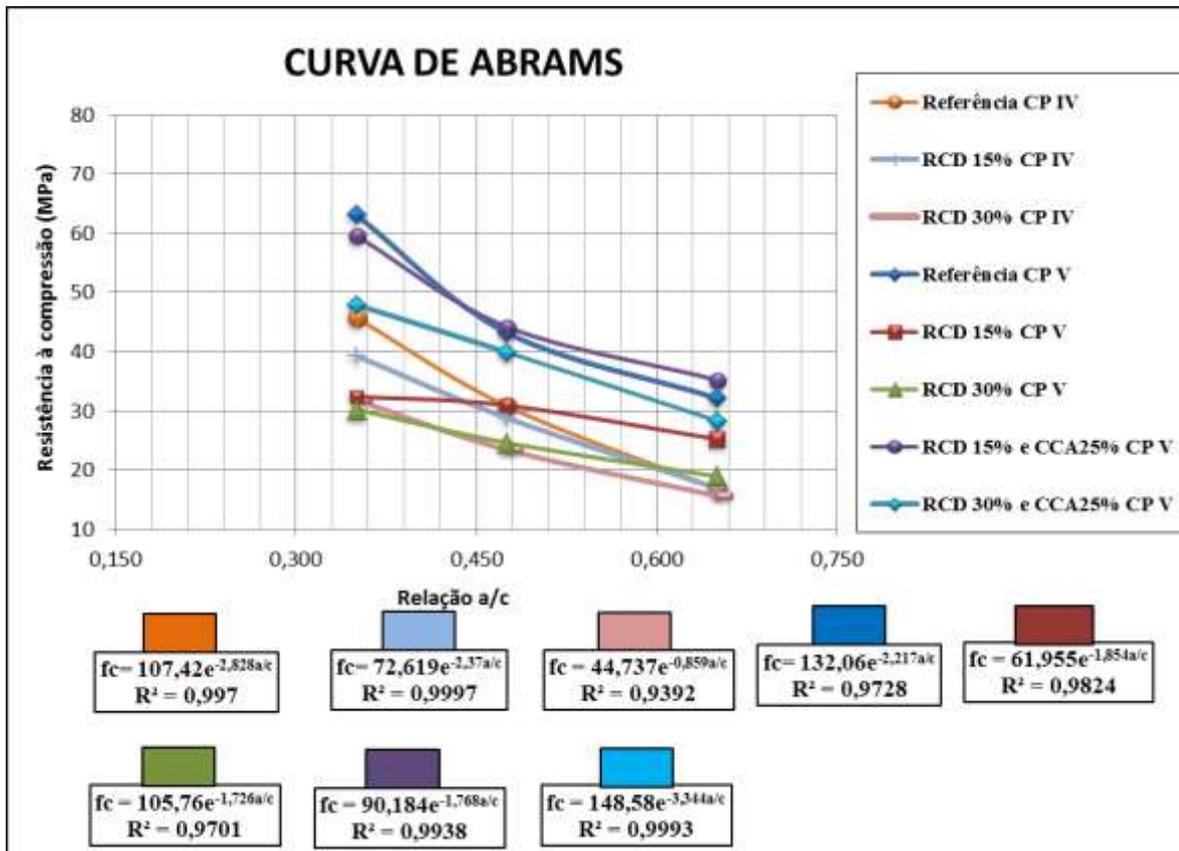
Os resultados obtidos por meio dos procedimentos anteriores possibilitaram o traçado da curva de Abrams (Figura 4.7), e na Tabela 4.8 estão representados os traços com as devidas resistências aos 28 dias.

Tabela 4. 8 - Misturas de concreto para o traçado da curva de Abrams

Composição do traço	a/mc	Traço unitário (c:cca:a:b:red)	Aditivo %	Resistência média aos 28 dias (MPa)	Abatimento (cm)
<b>CIMENTO CP IV</b>					
Traço referência	0,35	1 : 1,13 : 2,13	0,3	45,7	10
	0,475	1: 1,89: 2,89	0,18	30,8	8
	0,65	1: 2,95: 3,95	-	16,8	8
RCD 15%	0,35	1: 1,13 : 1,81: 0,32	0,22	39,3	8
	0,475	1: 1,89: 2,46: 0,43	0,18	28,8	9
	0,65	1: 2,95: 3,36: 0,59	-	16,9	8
RCD 30%	0,35	1: 1,13: 1,49: 0,64	0,26	31,8	11
	0,475	1: 1,89: 2,02: 0,87	0,1	23,4	8
	0,65	1: 2,95: 2,77: 1,19	-	15,6	8
<b>CIMENTO CP V - ARI</b>					
Traço referência	0,35	1: 1,13: 2,13	0,16	63,1	9
	0,475	1: 1,89: 2,89	0,1	43,2	9
	0,65	1: 2,95: 3,95	-	32,1	8
RCD 15%	0,35	1: 1,13 : 1,81: 0,32	0,1	32,4	9
	0,475	1: 1,89: 2,46: 0,43	0,15	30,9	12
	0,65	1: 2,95: 3,36: 0,59	-	25,2	12
RCD 30%	0,35	1: 1,13: 1,49: 0,64	0,1	30,2	9
	0,475	1: 1,89: 2,02: 0,87	-	24,6	10
	0,65	1: 2,95: 2,77: 1,19	-	18,9	12
RCD 15% CCA 25%	0,35	0,75: 0,25: 1,02: 1,81: 0,32	0,4	59,6	11
	0,475	0,75: 0,25: 1,78: 2,46: 0,43	0,2	44,2	8
	0,65	0,75: 0,25: 2,85: 3,36: 0,59	0,2	35,2	8
RCD 30% CCA 25%	0,35	0,75: 0,25: 1,02: 1,49: 0,64	0,4	47,9	10
	0,475	0,75: 0,25: 1,78: 2,02: 0,87	0,38	39,9	10
	0,65	0,75: 0,25: 2,85: 2,77: 1,19	0,25	28,3	8

Fonte: Autoria própria

Figura 4. 7 - Curva de Abrams



Fonte: Autoria própria

A partir do traçado da curva de Abrams determinou-se a relação água/materiais cimentícios (a/mc) para cada um dos traços de concreto, partindo da resistência desejada estabelecida anteriormente de 31,6 MPa. Nas Tabelas 4.9 e 4.10 estão representadas as denominações de cada traço e os traços definitivos para cada mistura, respectivamente.

Tabela 4. 9 - Denominação e composição de cada um dos traços definitivos

Denominação do Traço	Resistência Característica (MPa)	Composição
TRIV	25	Traço Referência cimento CPIV
15RCDIV	25	15% de RCD cimento CPIV
30RCDIV	25	30% de RCD cimento CPIV
TRV	25	Traço Referência cimento CPV-ARI
15RCDV	25	15% de RCD cimento CPV-ARI
30RCDV	25	30% de RCD cimento CPV-ARI
15RCD25CCAV	25	15% de RCD + 25% de CCA cimento CPV-ARI
30RCD25CCAV	25	30% de RCD + 25% de CCA cimento CPV-ARI

Fonte: Autoria própria

Tabela 4. 10 - Definição dos traços de concreto a partir da curva de Abrams

Denominação do Traço	Traço Unitário	a/mc	Consumo de cimento (kg.m <sup>-3</sup> )	Aditivo (%)
TRIV	1: 1,98: 2,98	0,49	356,59	-
15RCDIV	1: 1,74 : 2,33: 0,41	0,45	381,71	0,10
30RCDIV	1: 1,13: 1,49: 0,64	0,35	483,46	0,10
TRV	1: 2,89: 3,89	0,64	276,91	-
15RCDV	1: 1,43: 2,07 : 0,36	0,40	440,29	0,13
30RCDV	1: 0,82: 1,28 : 0,55	0,30	581,48	0,12
15RCD25CCAV	0,75 : 0,25 : 3,03 : 3,52: 0,62	0,68*	255,84	0,10
30RCD25CCAV	0,75 : 0,25 : 2,54 : 2,55: 1,09	0,60	286,40	0,14

Fonte: Autoria própria

\*Como se trabalhou com igualdade de resistências o traço ultrapassou os limites estabelecidos pela ABNT 12655:2015 para a relação água/materiais cimentícios (0,65), desta forma realizou-se os cálculos por meio de interpolação para que esse valor (0,68) ficasse dentro do limite. Que resultou na relação água/materiais cimentícios (a/mc) 0,64 e resistência a compressão axial de 34,7 MPa aos 28 dias.

Após a determinação dos traços definitivos, representou-se a quantidade de materiais por m<sup>3</sup> de concreto através da Tabela 4.11. Em seguida foram realizadas as moldagens desses traços para possibilitar a análise das propriedades do concreto.

Tabela 4. 11 - Quantidade de materiais por m<sup>3</sup> de concreto

Denominação do traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	RCD (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
TRIV	356,59	-	706,05	1062,64	-	174,73	-
15RCDIV	381,71	-	664,18	889,39	156,50	171,77	0,38
30RCDIV	483,46	-	546,31	720,36	309,42	169,21	0,48
TRV	276,91	-	800,27	1077,18	-	177,22	-
15RCDV	440,29	-	629,61	911,40	158,50	176,12	0,57
30RCDV	581,48	-	476,82	744,30	319,82	174,45	0,69
15RCD25CAAV	255,84	63,96	775,20	900,57	158,62	173,97	0,25
30RCD25CAAV	286,40	71,60	727,47	730,33	312,18	171,84	0,40

Fonte: Autoria própria

#### 4.3 ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados com o concreto no estado endurecido referem-se aos ensaios de resistência mecânica e durabilidade. Quanto aos primeiros foram realizados ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade; e a durabilidade do concreto, foi avaliada por meio da carbonatação acelerada.

#### 4.3.1 Ensaio de resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram determinados através da norma NBR 5739: 2007, em que foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 10x20mm por idade para cada um dos traços, sendo que eles foram retificados e submetidos à prensa hidráulica nas idades de 28 e 91 dias (Figuras 4.8 e 4.9, respectivamente).

Figura 4. 8 - Retificação dos corpos de prova



Fonte: Aatoria própria

Figura 4. 9 - Ruptura dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria

Para os 4 corpos de prova moldados para o mesmo traço foi calculado o desvio médio relativo, em que o valor máximo a ser atingido estabelecido foi de 10%, nos casos que ultrapassou este valor, foi descartado o valor entre os 4 corpos de prova que mais se afastou da média e recalculada a nova média. E a média resultante não deveriam deferir mais do que  $\pm 5\%$  do valor da resistência de dosagem calculada  $f_{c28}$ , ou seja, deveriam encontrar-se dentro do intervalo  $31,6 \pm 1,6$  MPa.

#### 4.3.1 Ensaio de Módulo de Elasticidade

Entre as propriedades mecânicas do concreto endurecido, como a resistência à compressão e a tração, o módulo de elasticidade também se caracteriza como um importante fator a ser estudado. Conforme Melo Neto e Helene (2002) a base para o dimensionamento de uma estrutura de concreto armado são as propriedades mecânicas do concreto, resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.

Para o estudo desta propriedade do concreto, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos 10x20 cm para cada um dos traços, para a idade de 28 dias. Os procedimentos para a realização do ensaio foram orientados pela norma NBR 8522: 2008, em que foi utilizada a determinação através do módulo tangente inicial.

Os corpos de prova foram fixados por meio das garras de um extensômetro eletrônico composto por dois sensores independentes (Figura 4.10), e para obter a deformação o equipamento emite uma média através da leitura de cada sensor, sendo que esta leitura é fornecida diretamente para o software integrado TESC, da EMIC, pois o extensômetro é compatibilizado com a máquina de ensaio.

Figura 4. 10 - Extensômetro fixado ao corpo de prova



Fonte: Autoria própria

A determinação do módulo de elasticidade é de extrema importância para esta pesquisa, pois permite fazer uma comparação entre os agregados naturais e os reciclados, sendo que os últimos geralmente apresentam uma diminuição do módulo de elasticidade em relação aos agregados naturais.

#### **4.3.2 Ensaio de durabilidade do concreto**

O ensaio realizado para relacionar à durabilidade do concreto e a conseqüente influência sobre a sustentabilidade foi o ensaio de carbonatação acelerada, que teve como objetivo determinar as profundidades e os coeficientes de carbonatação.

Para a realização deste ensaio necessita-se que os corpos de prova estejam com uma concentração de umidade em equilíbrio, com  $(75 \pm 2)\%$  de umidade relativa de um ambiente

aéreo com temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C e com distribuição uniforme de água evaporável, que é o processo denominado pré-condicionamento, realizado de acordo com as recomendações da RILEM TC 116- PCD (RILEM, 1999).

#### 4.3.2.1 Pré – condicionamento

Foram moldados corpos de prova cilíndricos 10x20 cm para cada um dos traços de concreto, 2 por idade e mais 1 para o pré-condicionamento, em seguida foram curados por um período de 7 dias em câmara úmida e após em temperatura ambiente até completar 41 dias. Finalizada esta etapa cada um dos corpos de prova foi cortado em duas partes, formando assim quatro amostras do mesmo traço, com dimensões aproximadas de 10x10 cm, e impermeabilizados em torno dos seus perímetros e uma das bases, por meio de pintura com três demãos de verniz poliuretânico, possibilitando assim, que o fluxo de CO<sub>2</sub> ocorresse de forma axial (Figura 4.11).

Figura 4. 11 - Selagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria

Partindo-se da idade escolhida para o ensaio, 91 dias, foi adotado um período de sazonalamento de 41 dias, em que foram subtraídos sucessivamente os prazos previstos para cada uma das fases, que são: redistribuição de umidade (14 dias), pré-secagem (14 dias), determinação dos parâmetros de pré-secagem (14 dias), selagem lateral (3 dias), corte (2 dias), deixando um excesso de 3 dias para possíveis imprevistos, como sugerido por Frizzo (2001).

Após a realização da selagem deu-se início aos procedimentos para a obtenção dos parâmetros de pré-secagem, seguindo as recomendações da RILEM TC 116- PCD (RILEM, 1999), como apresentado a seguir:

- 1) Primeiro pesou-se uma das fatias ( $m_0$ ), como está representado na Figura 4.12;

Figura 4. 12 - Pesagem da fatia que não foi moída



Fonte: Autoria própria

- 2) Em seguida esta mesma fatia foi colocada em uma estufa em temperatura de 105 °C e pesada a cada 24 horas até atingir variação entre duas pesagens de  $\pm 0,5g$ , obtendo-se desta forma o peso seco da amostra ( $m_d$ ), Figura 4.13;

Figura 4. 13 - Fatia na estufa a 105 °C



Fonte: Autoria própria

3) A outra fatia da mesma amostra foi moída e peneirada entre as peneiras #6,3 mm e #2,4 mm, sendo deste material selecionado 500g e pesado (Figura 4.14);

Figura 4. 14 - Amostra moída



Fonte: Autoria própria

4) O material moído foi levado a câmara climática Caron, modelo 6034 disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria, onde se manteve temperatura de  $23\pm 2$  °C e umidade relativa de  $75\pm 2$  %. Este material foi pesado a cada 24 horas até atingir diferença de peso de 0,1g entre duas pesagens consecutivas. Obtendo-se assim o peso em equilíbrio de umidade relativa do ar de 75% ( $m_{e75}$ ), Figura 4.15;

Figura 4. 15 - Amostra na câmara para atingir o equilíbrio de umidade



Autoria própria

5) Após este procedimento a amostra foi colocada em uma estufa a 105°C e pesada a cada 24 horas até atingir diferença de peso de 0,1g, obtendo-se desta forma o peso seco da amostra moída ( $m_{d75}$ ), Figura 4.16;

Figura 4. 16 - Amostra moída colocada na estufa para obter o peso seco



Fonte: Autoria própria

6) Através dos valores obtidos nos itens 1 e 2 aplicou-se as equações 1, 2 e 3 resultando assim, no conteúdo total de água evaporável ( $W_e$ ) e na concentração de água evaporável ( $w_e$ ).

$$w_e = \frac{W_e}{m_d}$$

*Equação(1)*

$$W_e = m_o - m_d$$

*Equação(2)*

$$W_e = \frac{(m_o - m_d)}{m_d}$$

*Equação(3)*

Os resultados obtidos no item 3 foram aplicados nas equações 4, 5 e 6, obtendo-se assim para a umidade relativa de 75%, conteúdo de água evaporável ( $W_{e75}$ ) e a concentração de umidade de equilíbrio ( $w_{e75}$ ).

$$w_{e75} = \frac{W_{e75}}{m_{d75}}$$

*Equação(4)*

$$W_{e75} = m_{e75} - m_{d75}$$

*Equação(5)*

$$w_{e75} = \frac{(m_{e75} - m_{d75})}{m_{d75}}$$

*Equação(6)*

Com os valores obtidos no itens 4, 5 e 6 conseguiu-se obter a variação do peso ( $\Delta m$ ) por meio da equação 7, que corresponde a perda de umidade da fatia mencionada no item 1.

$$\Delta m = \frac{(w_e - w_{e75})}{(1 + w_e)} \cdot m_o$$

*Equação(7)*

Após esse procedimento, todas as fatias foram pesadas, e por relação linear obteve-se o valor de  $\Delta m$  para cada uma. Em seguida, elas foram levadas para a estufa a temperatura de 50 °C e pesadas durante intervalos sucessivos até atingir seu respectivo  $\Delta m$ , significando ter atingido teor de umidade de 75%, com tolerância de 5% de variação, obtida pela equação 8.

$$\frac{(\Delta_{mobs.} - \Delta_{mcalc.})}{\Delta_{mcalc.}} \leq 0,05$$

*Equação(8)*

Ao atingir a perda de peso calculada as amostras foram levadas para a estufa a temperatura de 50 °C para realizar a distribuição da umidade. Tendo em vista que as amostras poderiam perder umidade para o exterior, elas foram impermeabilizadas com duas camadas de papel filme de PVC e dois sacos plásticos, e por último colocadas dentro de sacos plásticos aluminizados (Figura 4.17). Nestas situações as amostras permaneceram até um dia antes de irem para a câmara de carbonatação.

Figura 4. 17 - Impermeabilização das amostras e distribuição da umidade



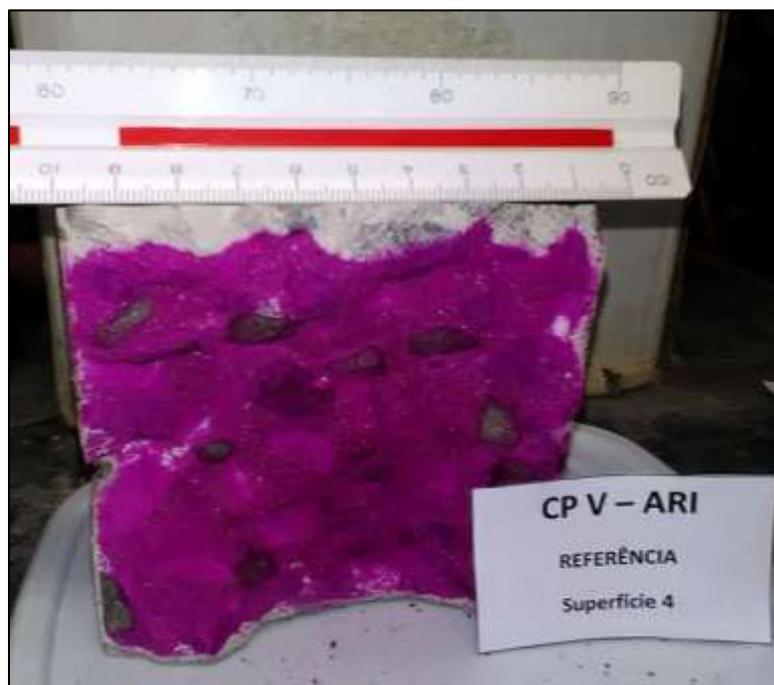
Fonte: Autoria própria

#### 4.3.2.2 Carbonatação acelerada

Finalizadas as operações de pré-condicionamento, os demais corpos de prova foram colocados em câmara climatizada digital aos 91 dias de idade, em condições 3% de CO<sub>2</sub>, 75% de umidade relativa, e temperatura de 23°C.

Após o período de 4, 8, 12 e 16 semanas foram medidas as profundidades carbonatadas, em que os corpos de prova foram aspergidos com solução de fenolftaleína e fotografados (Figura 4.18). Cada imagem foi colocada em escala e em unidade de milímetros (mm), e na intersecção das cores da amostra, que representa a área carbonatada e não carbonatada foi desenhada uma *polyline*, e ainda foram desenhadas linhas verticais com afastamentos entre si de 1 milímetro. Através da rotina denominada “COTA.LSP”, desenvolvida em Autolisp, que é uma linguagem do programa AutoCAD (AUTODESK, 2015), determinou-se o comprimento dessas linhas, sendo as medidas obtidas ordenadas em uma planilha do Excel e realizado o tratamento estatístico, para determinar a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Figura 4. 18 - Aspersão de fenolftaleína nas amostras para medição da profundidade carbonatada



Fonte: Autoria própria

Entre os modelos que podem ser utilizados para determinar a profundidade de carbonatação, utilizou-se o modelo de Tuuti (1982), como estabelece a Equação 9, com coeficiente  $n=0,5$ , ambiente interno e abrigado.

$$e = KCO_2 \cdot t^n$$

(Equação 9)

$e$  = profundidade carbonatada

$n$  = expoente variável dependente das condições de umidade

$KCO_2$  = coeficiente de carbonatação expresso em  $\text{mm/semana}^{0,5}$  ou  $\text{mm/ano}^{0,5}$

Com o intuito de avaliar a vida útil da estrutura, nesta pesquisa o estudo da carbonatação foi feito de forma simplificada, não considerando os demais fatores de deterioração. Por este motivo e por tratar-se de um estudo comparativo, considerou-se que através do modelo de Tuuti (1982) conseguiu-se estabelecer as comparações entre os diferentes tipos de concreto estudados.

#### 4.3.4 Análise estatística

Buscando prever o comportamento das variáveis de resposta em função das de controle, realizou-se o tratamento estatístico. Com a Análise de Variância (ANOVA) conseguiu-se determinar os fatores que interferem significativamente nas variáveis de resposta, determinando se elas são significativas ou não para modelo que está sendo analisado. Para esses procedimentos adotou-se grau de confiança de 95%.

#### 4.3.5 Impactos ambientais e custos

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite analisar todo o processo produtivo, desde a aquisição de matérias-primas até a disposição final dos produtos, indicando assim quais fases são responsáveis pelos maiores impactos. A Avaliação do Ciclo Vida modular (ACV-m), proposta pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014) apresenta uma estrutura semelhante com a ACV tradicional, porém mais reduzida, tornando assim, a avaliação mais prática, devido a menor complexidade do levantamento, focada nos aspectos ambientais mais relevantes, que são:

- Consumo de energia - eficiência na utilização da energia e contribuição para o esgotamento de fontes de energias não renováveis;
- Consumo de água – contribuição para o stress hídrico e suas respectivas consequências;
- Consumo de matérias-primas - ação sem manejo ou acima da biocapacidade, consumindo recursos não renováveis ou explorando os recursos renováveis;
- Geração de resíduos – risco de contaminação ambiental por materiais que poderiam ter outra finalidade a não ser o descarte, desperdício de recursos;
- Mudanças climáticas – emissão de CO<sub>2</sub> e demais gases que contribuem para o efeito estufa.

Existem diferentes modelos para avaliar esses impactos ambientais, o presente estudo adotou os princípios da NBR 14040 (2014) com auxílio do software SimaPro 8.4.

Para a realização dos cálculos do custo de vida utilizou-se a Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO, 2008). Em que alguns dados foram aproveitados dos estudos de Silva (2014) e Lamberti (2015), sendo atualizados para março/2017. Adotou-se

percentual de encargos sociais de 117,66% de acordo com o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2015).

#### 4.3.6 Software SimaPro

O software SimaPro é uma ferramenta de grande importância para a avaliação dos impactos ambientais, pois permite analisar e monitorar o desempenho ambiental dos produtos, serviços e processos para todas as etapas do ciclo de vida, a Figura 4.19 ilustra o lançamento dos dados de entrada no software.

Figura 4. 19 - Ilustração da página do software SimaPro

The screenshot shows the SimaPro software interface. On the left is a navigation pane with categories like 'Assistentes', 'Objetivo e âmbito', 'Inventário', 'Avaliação de impacto', etc. The main area is divided into a tree view on the left and a data table on the right. The tree view shows 'Fases do produto' expanded, with sub-items like 'Montagem', 'Ciclo de vida', 'Cenário de destino final', 'Desmontagem', and 'Reutilizar'. The table on the right lists data entries with columns for 'Nome', 'Projeto', and 'Status'.

Nome	Projeto	Status
1-Pilar REF CP IV	Projeto Cristiane	Nenhum
2-Pilar 15%RCD CP IV	Projeto Cristiane	Nenhum
3-Pilar 30%RCD CP IV	Projeto Cristiane	Nenhum
4-Pilar REF CPV-ARI	Projeto Cristiane	Nenhum
5-Pilar 15%RCD CP V-ARI	Projeto Cristiane	Nenhum
6-Pilar 30%RCD CPV-ARI	Projeto Cristiane	Nenhum
7-Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Projeto Cristiane	Nenhum
8-Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI	Projeto Cristiane	Nenhum

Fonte: Autoria própria

Esse software está presente no mercado desde a década de 90 e hoje é utilizado por mais de 80 países, pois se tornou uma ferramenta muito confiável tanto para indústrias, como para universidades, empresas de consultorias, entre outros que o usufruem para Avaliar o Ciclo de Vida (ACV), tendo como base as normas ISO 14040 e 14044.

De acordo com o manual do software (PRÉ Consultants, 2016) o SimaPro dispõem de uma série de métodos de avaliação de impacto, que são utilizados para calcular os resultados da avaliação do impacto. Esse software também apresenta um banco de dados completo de uma gama de produtos, possibilitando também a criação de novos produtos e processos. No entanto, os resultados obtidos através do programa podem ser apresentados individualmente

ou agrupados de forma comparativa, possibilitando a interpretação através de tabelas, gráficos e fluxogramas.

#### **4.3.7 Vida útil - unidade funcional**

De acordo com a norma NBR 15575 (2013) a vida útil de projeto de uma edificação é o período em que edifícios ou sistemas têm a capacidade de atender as atividades para os quais foram projetados e construídos. No entanto, os fatores que interferem na vida útil estão relacionados com a qualidade com que a obra foi executada, bem como as características dos materiais utilizados, a utilização correta de todas as partes da edificação, períodos de limpeza e manutenção, alterações climáticas, entre outros fatores que podem alterar a vida útil de uma edificação. Entretanto, a norma apresenta a vida útil das diferentes partes de uma edificação e fixa como vida útil mínima para uma estrutura, o período de 50 anos. Mas para que se atinja a vida útil estimada é necessária a manutenção conforme o Manual de Manutenção, Uso e Operação da Edificação.

Dentro deste contexto, a presente pesquisa adotou como unidade funcional em estudo (pilar de concreto armado), vida útil mínima de 50 anos, considerando-se que este pilar está localizado no térreo do edifício, ao abrigo das intempéries, sendo o fenômeno da carbonatação o único fator deteriorante considerado. Os diferentes tipos de pilares em estudo que não atingiram a vida útil estimada através do ensaio de carbonatação receberam uma pintura superficial com tinta acrílica para a proteção, pois conforme fabricantes da tinta acrílica a vida útil da pintura sobre a superfície de concreto é prolongada, apresentando durabilidade entre 2 e 10 anos, dependendo das condições de exposição e localização. Como nesta pesquisa o pilar analisado está disposto no térreo da edificação, não estando exposto a chuva e ao sol, a vida útil da pintura com tinta acrílica foi estimada em 8 anos, baseado nas recomendações da vida útil média de um sistema de pinturas abrigadas do tempo.

Ao aplicar uma cobertura superficial ao concreto consegue-se reduzir a penetração de CO<sub>2</sub>, Kazmierczak e Helene (1995) estudaram a aplicação de diversos tipos de materiais, e concluíram que após 50 anos de exposição do concreto com proteção de verniz acrílico, ocorre a redução da profundidade de carbonatação em torno de 2 a 3 vezes comparando-o com o concreto de referência. Mas vale frisar que os resultados dependem muito do método de aplicação da camada de proteção. No entanto, nesta pesquisa adotou-se redução de 2,5 no

coeficiente de carbonatação dos pilares que necessitaram de cobertura superficial para atingir a vida útil mínima de 50 anos.

Ainda em relação à redução da carbonatação por revestimentos por pintura, Park (2008) estudou 4 tipos de tintas orgânicas diferentes, nomeadamente de poliuretano, de cloreto de polivinilo, de epóxi, e acrílico. E depois de suas análises concluiu que as tintas se apresentam como uma grande barreira para o combate à corrosão das armaduras causadas pela carbonatação, mas estas só são eficazes quando se encontram saudáveis, ou seja, até se degradarem naturalmente devido ao calor, humidade, radiação ultra violeta, etc.

Conforme pesquisas bibliográficas verificou-se que as tintas são os materiais mais utilizados como barreira à proteção do concreto contra a carbonatação.

#### 4.4 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Nesta etapa foram estabelecidos os fluxos de entrada e saída de material e energia para cada uma das unidades dos processos do sistema relacionado ao produto. Em que o cálculo foi realizado da seguinte maneira:

- A partir dos dados, classificou-se os fluxos elementares em “entrada” ou “saída”;
- Uniformizou-se os dados em quantidade.ano<sup>-1</sup>;
- Calculou-se o total de materiais, combustíveis e energias, envolvidos em todo o processo unitário;
- Dividiu-se o total de cada um dos insumos pelo total de material principal produzido, expresso em quilogramas (kg);
- Obtendo-se os fluxos de entrada e de saída de cada unidade do processo.

Esta pesquisa considerou alguns dados do inventário formulado por Silva (2014), como as fases de obtenção da matéria-prima e execução do pilar, e, além disso, envolveu as fases de uso/manutenção, demolição e reciclagem da unidade funcional em estudo, com base nos dados coletados por Lamberti (2015).

Para as fases de obtenção de matéria-prima e execução da unidade funcional (pilar), obtiveram-se os dados sobre os agregados, grão e miúdo, e do cimento CPIV e CPV-ARI diretamente com as fábricas fornecedoras desses materiais. Os dados sobre a água, madeira e aditivo empregados, foram retirados do banco de dados do programa SimaPro 8.4. Já as informações relacionadas ao aço foram retiradas do Relatório de Sustentabilidade do Aço, 2012, do Instituto Aço Brasil (2013). Constatou-se a necessidade da realização dos cálculos

de fluxos elementares do óleo diesel, energia elétrica e o explosivo que foram utilizados na pedreira. Desta forma, o inventário do combustível (óleo diesel) procedeu-se por meio da conversão da energia emitida da queima de combustível para a quantidade, dado em gramas, de cada um dos elementos da queima, como: Monóxido de Carbono (CO); hidrocarbonetos (HC); óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_{(x)}$ ); e material particulado (MP). Para a obtenção da brita foram empregados explosivos em forma de lama, sendo quantificadas as emissões através de cálculos estequiométricos. No entanto, para a quantificação dos dados sobre energia elétrica, foram determinadas as emissões de dióxido de carbono através da média das emissões durante o período de outubro de 2012 a setembro de 2013, disponibilizados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2013). A cinza de casca de arroz foi utilizada como material substituinte parcial do cimento, e RCD como substituição do agregado graúdo, consideraram-se os dados sobre a cinza do banco de dados do software Simapro 8.4, e para o RCD os dados relacionados à reciclagem dos resíduos.

Na sequência foram utilizados dados de inventário que se referem às fases de uso e manutenção, desconstrução e reciclagem. Considerando-se que, para manter a estética e a vida útil, a unidade funcional sem pintura deveria ser lavada a cada três anos. Desta forma para realizar o inventário da água, foram utilizados dados disponíveis no banco de dados do Software SimaPro 8.4. Para quantificar a água que seria utilizada para as lavagens, utilizou-se a tabela da TCPO (2008), obtendo-se assim, a quantidade total de água que seria consumida. Desta maneira, teve que ser contabilizada a energia elétrica que foi consumida pelo equipamento de lavagem, sendo também obtidos os valores através da TCPO (2008). Em relação à tinta acrílica utilizada na pintura dos pilares, obteve-se os valores por meio do banco de dados do software SimaPro 8.4. E para a quantificação de  $\text{CO}_2$  fixada pelo pilar de concreto, foi adotada profundidade carbonatada (x) de 0,025 metros para cada uma das misturas de concreto, pois este foi o revestimento da armadura adotado, e os cálculos foram realizados por um método considerado o mais utilizado entre os pesquisadores, que está representado pela Equação 10.

$$\text{CO}_2 = x \cdot c \cdot \text{CaO} \cdot R \cdot A \cdot M$$

(Equação 10)

Onde:

x é profundidade carbonatada em metros;

c é a quantidade (kg/m<sup>3</sup>) de clínquer no aglomerante;

CaO é a proporção de óxido de cálcio, adotado 0,65 (COLLINS, 2010), onde o valor 1 seria 100%;

R é a proporção de CaO totalmente carbonatada e transformada em CaCO<sub>3</sub> assumido 0,75, (LAGERBLAD, 2005);

A é a área de concreto exposta (m<sup>2</sup>);

M é a fração molar química adimensional de CO<sub>2</sub>/CaO = 0,79 (COLLINS, 2010).

A composição do cimento utilizado foi retirada da apostila técnica de cimento (ITAMBÉ, 2010), em que os teores de clínquer nos cimentos CPIV e CPV-ARI foram de 63,14% e 92,72%, respectivamente. Considerando que os traços de concreto estudados nesta pesquisa são diferentes que os de Lamberti (2015), calcularam-se as quantidades de clínquer por metro cúbico, representada na Tabela 4.12.

Tabela 4. 12 - Quantidade de clínquer. m<sup>-3</sup>

<b>Traço</b>	<b>kg de cimento. m<sup>-3</sup></b>	<b>kg de clínquer. m<sup>-3</sup></b>
<b>TRIV</b>	356,59	225,15
<b>15RCDIV</b>	381,71	241,01
<b>30RCDIV</b>	483,46	305,26
<b>TRV</b>	276,91	256,75
<b>15RCDV</b>	440,29	408,24
<b>30RCDV</b>	581,48	539,15
<b>15RCD25CAAV</b>	255,84	237,21
<b>30RCD25CAAV</b>	286,4	265,55

Fonte: Autoria própria

Na fase de desconstrução e reciclagem, Lamberti (2015) considerou a realização da demolição por meio de um martelo rompedor, que utiliza óleo diesel para o seu funcionamento, e o carregamento dos entulhos gerados, bem como o diesel consumido no transporte deste material, foram obtidos por meio de dados retirados da tabela TCPO (2008), possibilitando a realização do inventário. Após a chegada do entulho ao seu destino, empresa GR2 localizada na cidade de Santa Maria – RS considerou-se o consumo de óleo diesel pelas máquinas para a realização dos procedimentos, como a separação do aço e a britagem do

entulho. No Apêndice C estão os dados de entrada inseridos no *software* SimaPro, maiores detalhes sobre o inventário podem ser consultados nas dissertações de Silva (2014) e Lamberti (2015).

#### **4.4.1 Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida**

Nesta fase do ciclo de vida foi realizada a avaliação de forma quantitativa e qualitativa dos impactos ambientais em relação às entradas e saídas que foram mencionadas nos estudos anteriores e especificadas na fase de objetivo e escopo.

No entanto, para transcrever os dados numéricos do inventário em resultados ambientalmente relevantes, fez-se o uso de métodos de avaliação de impactos, sendo que cada um dos métodos que podem ser utilizados possuem seus princípios de medições e fatores de caracterização, normalização e ponderação.

O método de avaliação adotado nesta pesquisa foi o *Eco-indicator 99*, o qual utiliza para a categoria de saúde humana itens como: as mudanças climáticas; problemas respiratórios causados por substâncias orgânicas e inorgânicas e radiação ionizante; e destruição da camada de ozônio. Para os aspectos relacionados à qualidade dos ecossistemas são considerados o uso da terra, eutrofização e acidificação, e ainda a ecotoxicidade. Por sua vez a classe dos recursos engloba o esgotamento de minerais e combustíveis fósseis. Desta forma, o resultado final dessas quantificações foi representado na unidade de *Pt*, que equivale a um milésimo da carga ambiental média anual de um cidadão europeu.

#### **4.4.2 Interpretação do Ciclo de Vida**

Os impactos ambientais individuais foram obtidos baseando-se nos parâmetros e procedimentos realizados nas etapas iniciais do estudo e por meio do *software* SimaPro conforme a metodologia de ACV-m, em que foram considerados impactos como mudanças climáticas, uso de recursos naturais, geração de resíduos, consumo de energia e de água e pegada do carbono, totalizando os impactos relacionados ao pilar.

A realização da interpretação dos dados resultantes deu-se por meio do parâmetro técnico definido como a resistência à compressão do concreto, dada em unidades de megapascal (MPa) e a vida útil foi considerada em anos, os impactos ambientais foram quantificados no total de *Pt*, calculados através do *software* SimaPro. Após esses

procedimentos a sequência se deu através da realização de um comparativo unitário, baseado na divisão dos dados obtidos pela vida útil em anos e a resistência à compressão aos 28 dias de idade ( $fc_{28}$ ), e para finalizar foram estabelecidos os índices aos resultados das diferentes alternativas de pilar, em relação ao traço referência.

No entanto, para a realização completa da análise dos impactos ambientais foi necessário calcular o impacto das emissões de gás carbônico equivalente ( $CO_{2eq}$ ) de cada uma das alternativas de pilar propostas anteriormente, considerando-se que cada um dos pilares libera e absorve  $CO_2$  de maneira diferente. Para esses cálculos utilizou-se o inventário que foi gerado pelo software SimPro, representado no Apêndice D, bem como os fatores de equivalência adaptados da Tabela 2.14 do Fourth Assessment Report (Quarto Relatório de Avaliação) (IPCC, 2007b), representados na Tabela 4.13.

Tabela 4. 13 - Fatores utilizados para a quantificação do  $CO_{2eq}$

<b>Substância</b>	<b>Fator de equivalência</b>
Água ( $H_2O$ )	0,0176
Clorofórmio ( $CHCl_3$ )	31
Dióxido de carbono , a transformação de terras	1
Dióxido de carbono , biogênicos	1
Dióxido de carbono , no ar	1
Dióxido de carbono fóssil	1
Etano , 1,1- difluoro - , HFC - 152a	124
Etano , 1,1,1,2 - tetrafluoro - , HFC - 134a	1430
Etano , 1,1,2 - tricloro - 1 ,2,2 - trifluoro - , CFC - 113	6130
Etano , 1,2- dicloro - 1 ,1,2,2 - tetrafluoro - , CFC - 114	10000
Hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ )	22800
Metano, biogênicos	25
Metano, bromoclorodifluormetano , Halon 1211	1890
Metano, bromotrifluoro - , Halon 1301	7140
Metano , clorodifluoro - , HCFC - 22	1810
Metano, dichlorodifluoro - , CFC-12	10900
Metano , dichlorofluoro - , HCFC - 21	151
Metano , fóssil ( $CH_4$ )	25
Metano, trichlorofluoro - , CFC-11	4750
Metano , trifluoro - , HFC - 23 ( $CHF_3$ )	14800
Óxidos de nitrogênio ( $N_2O$ )	298

Fonte: Adaptado IPCC, 2007

Para completar as análises, será realizada a integração dos resultados para escolher a melhor alternativa ambiental/econômica, através da média geométrica dos índices ambientais e econômicos  $(I_a \cdot I_e)^{0,5}$ .



## CAPITULO V

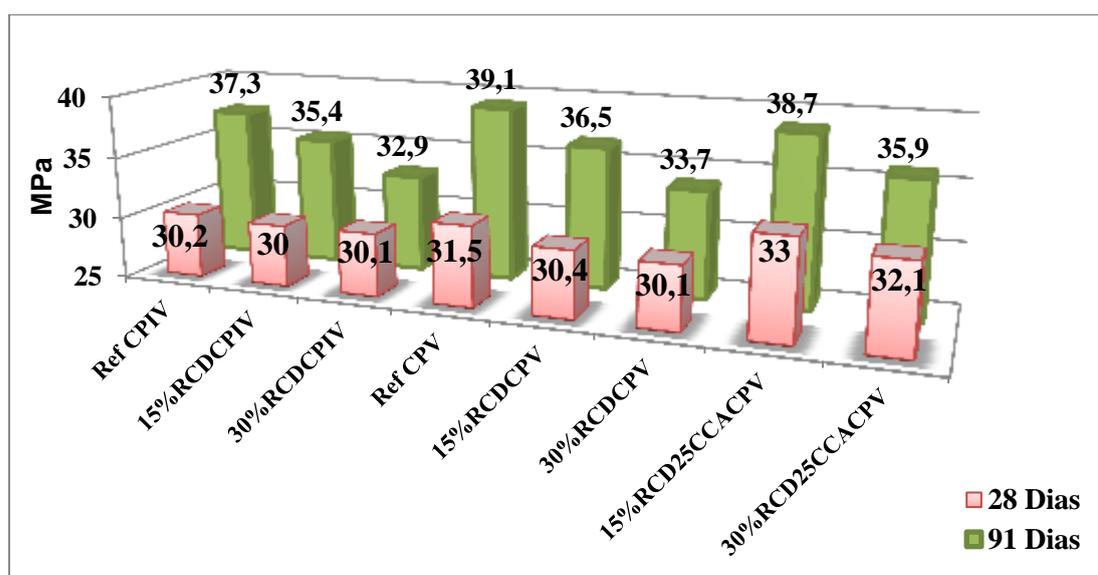
### 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados e discutidos os resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior. Primeiramente serão apresentados os resultados de Resistência à Compressão Axial aos 28 e 91 dias de idade, em seguida os resultados de Módulo de Elasticidade e ainda serão expostos os resultados de Carbonatação Acelerada ensaiados nas idades de 4, 6, 8, 12 e 16 semanas, e para finalizar será apresentada a Avaliação do Ciclo de Vida e do Custo de Vida.

#### 5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial do concreto foram realizados nas idades de 28 e 91 dias, sendo que aos 28 dias a resistência foi calculada para  $f_{ck} = 25$  MPa, como o desvio padrão adotado de acordo com a NBR 12655: 2015 foi de  $S_d = 4$  MPa, a resistência a ser atingida era  $f_{28} = 31,6$  MPa, aceitando-se variação de  $\pm 5\%$ , Figura 5.1. Desta forma, ensaiou-se 8 misturas diferentes de concreto e analisou-se quanto a influência dos materiais componentes de cada uma.

Figura 5. 1 - Resistência à Compressão Axial



Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 5.1 pode-se perceber que os concretos curados durante 28 dias em câmara úmida obtiveram resistência à compressão axial de acordo com o previsto, ou seja, todas as amostras apresentaram valores dentro do intervalo de  $f_{28}=31,6 \pm 5\%$ . Sendo que a melhor resistência foi alcançada com a mistura com 15%RCD + 25% CCA e cimento CPV, atingindo 33 MPa, representando 1,5 MPa acima da mistura de referência com o cimento CPV. Já para as demais amostras os valores apresentaram-se constantes, em torno de 30 MPa.

Ao aumentar o tempo de cura do concreto, conseqüentemente aumentou-se a resistência à compressão axial para todos os traços, alguns com acréscimos maiores e outros menores. Pode ser observado que a mistura de concreto que apresentou maior resistência aos 91 dias de idade foi a de referência com o cimento CP V, a mesma teve um aumento de 7,6 MPa em relação as leituras feitas aos 28 dias de idade. Nas demais amostras percebe-se que as substituições de agregados naturais por residuais diminuíram a resistência do concreto, e quando substituiu-se 15% de RCD com cimento CPV-ARI a queda de resistência foi de 2,6 MPa, sendo que aumentando-se a porcentagem de substituição para 30% de RCD esta queda foi ainda mais acentuada, chegando a 5,4 MPa. Leite (2001) afirma que a maior porosidade e menor resistência mecânica apresentada pelo agregado reciclado quando comparado ao agregado natural propiciam essa diminuição da resistência mecânica do concreto.

No momento em que juntamente com as substituições de agregados residuais substituiu-se também o cimento por 25% de pozolanas observou-se um aumento da resistência, que atingiu valores bastante próximos do traço de referência. Kou e Poon (2013) afirmam que o aumento da resistência em concretos com agregado reciclado e adição pozolânica se dá pela melhora da microestrutura na zona intersticial, aumentando a ligação entre o novo ligante e os agregados. Da mesma forma, Li, Xiao Zhou (2009) apontam que a zona de interface entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, pode ser melhorada, aumentando sua densidade com a utilização de materiais pozolânicos no entorno dos agregados reciclados, melhorando também a trabalhabilidade do concreto e aumentando a resistência à compressão e flexão.

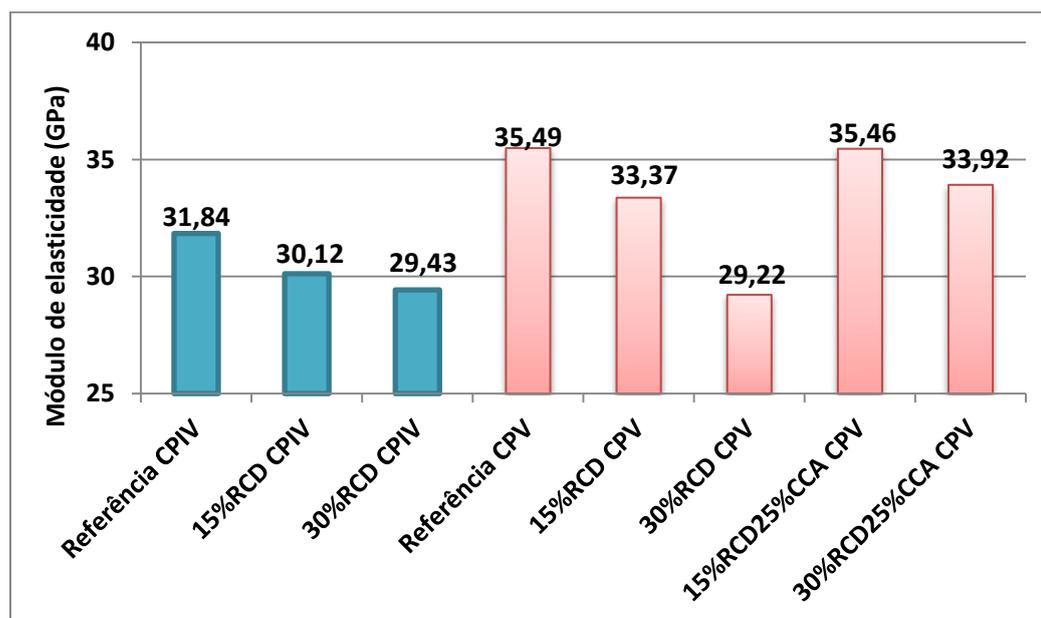
Ao analisar a Figura 5.1 quanto ao tipo de cimento CP IV, percebe-se que as resistências alcançadas foram um pouco menores do que com o cimento CP V, mas pode ser observado que ocorreu um processo semelhante quando se substituiu o agregado gráudo natural pelo residual, sendo a porcentagem de substituição inversamente proporcional à resistência à compressão, ou seja, aumentando-se a porcentagem de 15 para 30% de RCD diminui-se a resistência em 2,5 MPa.

No entanto, ao fazer a reutilização dos resíduos gerados pela própria construção civil, analisando a resistência a compressão deste concreto, a melhor alternativa a ser empregada nesta pesquisa é substituir parcialmente os agregados graúdos naturais por RCD e o cimento por cinza da casca de arroz, pois desta forma consegue-se diminuir os impactos ambientais e ao mesmo tempo não gera grandes perdas as propriedades do concreto.

## 5.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a norma NBR 8522:2008, com 28 dias de cura do concreto. Depois de finalizado foi possível elaborar a Figura 5.2 e fazer as devidas análises.

Figura 5. 2 - Módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Autoria própria

Ao observar a Figura 5.2 percebe-se que o maior módulo de elasticidade foi alcançado com o concreto referência CPV, chegando a 35,49 GPa. Com a substituição de agregados residuais, tanto com 15% como 30% houve redução deste valor que passou para 33,37 GPa e 29,22 GPa, respectivamente, o que significa que os mesmos são mais deformáveis que os concretos produzidos com agregados naturais. Em seu trabalho Carrijo (2005) obteve as mesmas verificações, em que nenhum dos concretos produzidos com agregados reciclados superou os concretos de referência em relação ao módulo de elasticidade, fato este também

presenciado nos trabalhos de Ângulo (2005), Xião et al. (2005), Poon et al. (2006), Sanchez (2004), entre outros.

Quando juntamente com o RCD substituiu-se 25% de pozolanas obtiveram-se valores muito semelhantes ao concreto de referência, tendo em vista que a cinza de casca de arroz proporcionou um aumento da resistência à compressão aos concretos com agregados residuais. Não foram encontrados em nenhuma bibliografia consultada, trabalhos relacionando pozolanas, RCD e módulo de elasticidade.

Em relação às misturas com o cimento CPIV observou-se que o módulo de elasticidade foi menor do que das misturas com o cimento CPV. E assim como ocorreu nas demais misturas, em que os agregados residuais diminuíram o módulo, com o cimento CPIV não foi diferente, sendo que quanto maior a porcentagem de substituição de RCD, menor o módulo, mostrando que as diferentes propriedades apresentadas por esses resíduos interferem nas características do concreto, e que nem sempre essas características apresentam-se como pontos positivos para o novo material.

### 5.3 CARBONATAÇÃO ACELERADA

Para o estudo da carbonatação acelerada foram feitas leituras em quatro idades, ou seja, durante 4, 8, 12 e 16 semanas de permanência das amostras na câmara de carbonatação, estando nas condições de temperatura 23 °C, 75% de umidade relativa e 3% de CO<sub>2</sub>. Para cada traço de concreto e idade foram analisadas quatro superfícies do mesmo traço e então realizadas as médias, com cerca de  $\pm 450$  valores. Na Tabela 5.1 pode ser observada a profundidade média de carbonatação dos diferentes traços de concreto estudados.

Tabela 5. 1 - Profundidade média de carbonatação acelerada

MISTURAS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		PROFUNDIDADES (mm)			
			(SEMANAS)			
	$f_{c_{28}}$	a/mc	4	8	12	16
TRIV	30,2	0,49	11,82	13,13	15,5	18,28
15RCDIV	30	0,45	10,49	13,77	16,1	20,28
30RCDIV	30,1	0,35	7,91	9,35	16,4	20,63
TRV	31,5	0,64	8,93	12,65	14,4	18,05
15RCDV	30,4	0,4	0	0	0	0
30RCDV	30,1	0,3	0	0	0	0
15RCD25CCAV	33	0,64	9,58	10,85	14,7	16,65
30RCD25CCAV	32,1	0,6	7,93	10,1	10,7	13,69

Fonte: Autoria própria

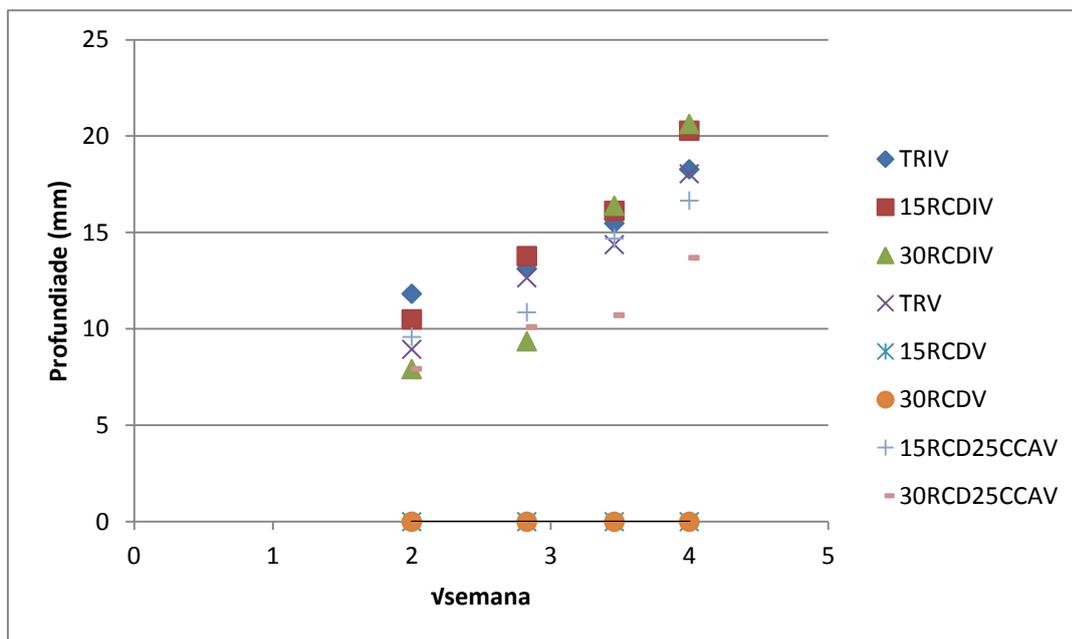
Percebe-se que as maiores profundidades de carbonatação ocorreram com as misturas de concreto com o cimento CP IV, tanto no traço referência como naqueles em que substituiu-se RCD em 15 e 30%. Em relação ao tipo de cimento e a carbonatação, Helene (1993) afirma com base em seus estudos, que na maioria das vezes as adições melhoram as propriedades do concreto, como por exemplo aumentando a resistência mecânica, reduzindo a permeabilidade e a porosidade, mas em outros casos, quando relacionado com a durabilidade, à medida que se aumenta a quantidade de adições ao cimento a solução intersticial do concreto preparado com cimento com menores teores de  $C_3S$  (silicato tricálcico), conseqüentemente o concreto apresentará uma menor quantidade de  $Ca(OH)_2$  assim, o  $CO_2$  penetrará com maior velocidade, pois ficará mais fácil a etapa inicial desse processo que é primeiro rebaixar o pH, reagindo com todo o  $Ca(OH)_2$  penetrando e precipitando o  $CaCO_3$  mais rapidamente na solução de poros.

Nas misturas de concreto com cimento CPV-ARI observa-se profundidades de carbonatação menores, principalmente com os concretos com substituições de 15 e 30% de RCD, que não apresentaram carbonatação durante as 4 idades observadas. Já as misturas com RCD e pozolana apresentaram profundidades de carbonatação semelhantes ao concreto convencional. Ao fazer essas observações é nitidamente visível a influência do fator água/materiais cimentícios (a/mc), pois aumentando-se essa relação aumentou-se também a profundidade de carbonatação, sendo um dos fatores que pode justificar a ausência de

carbonatação para as misturas 15 e 30% de RCD e cimento CP V-ARI, que foram estudadas com relações água/materiais cimentícios (a/mc) baixas (0,4 e 0,3), respectivamente. Fato observado também por Reis (2013), quanto maior era a relação água/materiais cimentícios adotada, maior foi o coeficiente ou a profundidade de carbonatação para todos os tipos de mistura. NUNES (1998) também afirma que a relação água/materiais cimentícios (a/mc) está intimamente ligada com a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido e com suas propriedades mecânicas finais. E quanto maior a relação maior será a porosidade e como consequência terá maior intensidade de propagação da carbonatação.

Com as médias das profundidades de carbonatação elaborou-se um gráfico (Figura 5.3), através das linhas de tendência com equação do tipo  $f(x) = a \cdot x + b$ , onde o coeficiente angular da reta, calculado por regressão linear ( $\sqrt{t}$  em semanas versus  $e$  em mm) “a” é o coeficiente de carbonatação ( $K_c$ ) em cada traço, e o valor ‘b’, resultado da liberdade da função, representa o ponto em que as retas cruzam o eixo das ordenadas, Tabela 5.2.

Figura 5. 3 - Profundidades de carbonatação



Fonte: Autoria própria

Tabela 5. 2 - Equações das médias de profundidade de carbonatação

TRAÇOS	$f(x) = a.x + b$	R <sup>2</sup>	Kc
TRIV	3,1955x + 4,8595	0,9372	3,20
15RCDIV	4,7157x + 0,6759	0,9701	4,72
30RCDIV	6,6388x - 6,8276	0,9088	6,64
TRV	4,3545x + 0,1208	0,9088	4,35
15RCDV	-	-	0,00
30RCDV	-	-	0,00
15RCD25CCAV	3,660x + 1,5529	0,9395	3,66
30RCD25CCAV	2,6536x + 2,4519	0,9227	2,65

Fonte: Autoria própria

Partindo desses dados e das especificações estabelecidas no dimensionamento do pilar de concreto armado, foi possível estimar a vida útil de cada uma das opções de pilar estudadas (Tabela 5.3), em que adotou-se um avanço da frente de carbonatação de  $x=20\text{mm}$  (25mm da camada de cobrimento, reduzido de 5mm da frente com pH entre 11 e 8,5), estimativa obtida por processos matemáticos.

O tempo estimado provável de vida útil está representado na última coluna, sendo que este cálculo leva em consideração a utilização de pintura nos pilares com estimativa de vida abaixo da vida útil mínima (50 anos) de acordo com a norma NBR 15575 (2013), e a vida útil máxima de 150 anos, de acordo com as descrições do capítulo anterior.

Tabela 5. 3 - Vida útil de cada um dos pilares com cobrimento efetivo de 20mm

Traços	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		a/mc	COEFICIENTE (mm x semana <sup>0,5</sup> )		TEMPO ESTIMADO TEÓRICO (anos) $t=(x/kc)^2$	Kc COM PINTURA (Kc ÷ 2,5)	TEMPO ESTIMADO PROVÁVEL
	f <sub>ck</sub>	f <sub>c28</sub>		Kc	r <sup>2</sup>			
TRIV	25	30,2	0,49	3,2	0,94	39	1,28	150
15RCDIV	25	30	0,45	4,72	0,97	17	1,88	113
30RCDIV	25	30,1	0,35	6,64	0,91	9	2,65	56
TRV	25	31,5	0,64	4,35	0,98	21	1,74	132
15RCDV	25	30,4	0,4	0	0	150*	-**	150
30RCDV	25	30,1	0,3	0	0	150*	-**	150
15RCD25CCAV	25	34,7	0,64	3,66	0,94	29	1,46	150
30RCD25CCAV	25	32,1	0,6	2,65	0,93	56	-**	56

\*Vida útil máxima considerada.

\*\*Somente lavagem.

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que os traços com 15 e 30% de RCD e cimento CPV não apresentaram

carbonatação, então o tempo estimado provável foi considerado vida útil máxima estabelecida (150 anos), conforme descrito na etapa da metodologia.

A maioria das alternativas de pilar necessitaram de pintura para alcançar a vida útil mínima (50 anos). Os piores resultados para o tempo estimado teórico foram com os concretos CPIV, apresentando a menor idade (9 anos) a mistura com 30% de RCD. Já para as misturas com o cimento CPV-ARI, o traço referência apresentou o menor tempo estimado teórico (21 anos). Para as misturas com o mesmo tipo de cimento e os dois teores de substituição, não houve carbonatação, adotando-se desta forma a vida útil máxima estabelecida de 150 anos para o tempo estimado teórico. O melhor tempo estimado teórico foi com a mistura de cimento CPV-ARI + 30% de RCD + 25%CCA, resultando em 56 anos. No entanto, as misturas que não necessitaram de pintura para atingir a vida útil mínima, foi esta última e as misturas com 15 e 30% de RCD para o mesmo tipo de cimento.

#### 5.4 ANÁLISE DOS CUSTOS

Os cálculos do custo do ciclo de vida foram realizados com a utilização da Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO, 2008), adotando-se 117,66% de encargos sociais de acordo com o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI, 2015), tendo como mês de referência março/2017. Na Tabela 5.4 estão representados os custos de cada tipo de pilar.

Tabela 5.4 - Composição dos custos

ETAPAS	Custos com encargos sociais (R\$.pilar <sup>-1</sup> )							
	TRIV	15RCD IV	30RCD IV	TRV	15RCD V	30RCD V	15RCD 25CCA V	30RCD 25CCA V
CONSTRUÇÃO	519,39	524,04	542,25	514,67	552,00	582,74	461,83	521,68
PINTURA	3240,7	2441,33	1209,86	2851,82	0,00	0,00	3240,7	0,00
LAVAGEM	0,00	0,00	0,00	0,00	1959,38	1959,38	0,00	731,5
DESCONSTRUÇÃO	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69	51,69
TRANSPORTE	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16
MANEJO DO RCD	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
<b>TOTAL</b>	<b>3826,1</b>	<b>3031,4</b>	<b>1818,1</b>	<b>3432,5</b>	<b>2577,4</b>	<b>2608,1</b>	<b>3768,5</b>	<b>1319,2</b>

Fonte: Autoria própria

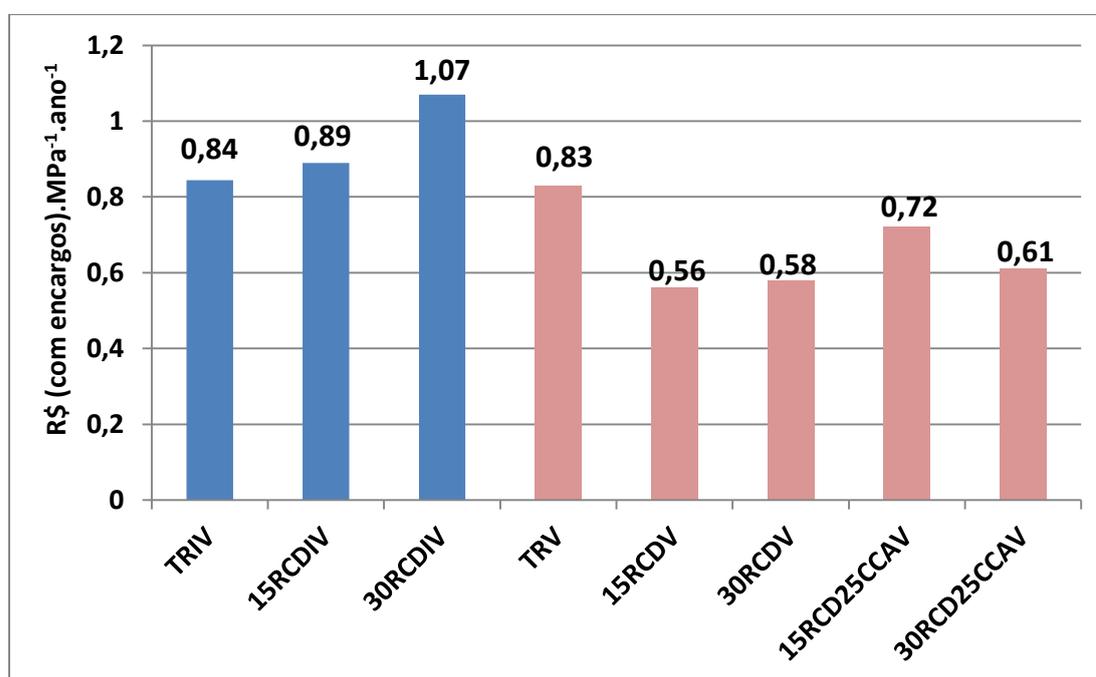
A composição dos custos foi realizada considerando que os pilares receberam lavagem ou pintura. Percebe-se que os custos mais elevados foram devido a pintura, valores estes que

superaram os demais itens analisados, inclusive o custo com a construção. Os valores referentes as lavagens também foram mais altos que os de construção do pilar, mas não tão elevados quanto os custos de pintura.

O pilar que teve o maior custo foi o TRIV, representando R\$ 3826,10, sendo a pintura responsável por 84,7% do custo total. Já o pilar com menor custo total foi o 30RCD25CCAV, com R\$ 1319,20, o mesmo apresentou lavagem correspondente a 55,4% do custo total. Os demais traços que apresentaram lavagem também tiveram o custo total mais baixo, 15RCDV (R\$ 2577,40) e 30RCD15CCAV (R\$ 2608,10). Conforme Reis (2008), a pintura pode ser responsável por cerca de 12% do valor inicial de uma obra, e se for considerada a manutenção da pintura ao longo de 100 anos, esse custo pode representar em torno de 60% do valor inicial da obra.

Desta forma, para fazer uma análise mais detalha, elaborou-se a Figura 5.4 que representa os custos unitários de cada tipo de pilar, em que se dividiu o custo total (R\$) pela resistência (MPa) aos 28 dias e pela vida útil (anos).

Figura 5. 4 - Custo unitário de cada alternativa de pilar



Fonte: Autoria própria

A alternativa de pilar que apresentou o maior custo unitário foi o 30RCDIV (1,07 R\$.MPa<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), sendo este o que apresentou o maior coeficiente de carbonatação entre todos os pilares (6,64) e o menor tempo teórico (9 anos), necessitando de pintura para prolongar a

vida útil, chegando a 56 anos de tempo estimado provável. O pilar 15RCDV obteve o menor custo unitário (0,56 R\$.MPa<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>), sendo um dos pilares que necessitou de lavagem, e apresentou um tempo teórico e provável de 150 anos.

## 5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Apartir dos resultados obtidos determinou-se a Análise de Variância (ANOVA) da influência do teor de RCD e da relação água/materiais cimentícios (a/mc) sobre a resistência à compressão axial, bem como a influência da relação água/materiais cimentícios (a/mc) e da resistência sobre o coeficiente de carbonatação, representados nas Tabelas 5.5 e 5.6, respectivamente. Com um nível de significância 0,05, que significa um grau de confiança superior a 95%.

Tabela 5. 5 - ANOVA da influência dos fatores sobre a resistência à compressão axial

<i>Fatores</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
RCD	789,61	1	789,61	9,995877	0,006929629	4,60011
a/mc	3706,679	1	3706,679	5666,97	1,15754E <sup>-19</sup>	4,60011

Fonte: Autoria própria

Nota: SQ = soma quadrada; gl = grau de liberdade; MQ = média quadrada; F = valor calculado; valor-p = significância; F crítico = valor tabelado para nível de significância 0,05.

De acordo com a Tabela 5.5 percebe-se que tanto o teor de RCD como a relação água/materiais cimentícios (a/mc) apresentam  $F > F_{crítico}$ , ou seja, ambos interferem significativamente na resistência à compressão axial das misturas estudadas. Porém a relação água/materiais cimentícios (a/mc) apresenta influência altamente significativa, pois o valor-p resultou em  $1,157E^{-19}$ , valor bem abaixo do valor-p utilizado (0,05).

Tabela 5. 6 - ANOVA da influência dos fatores sobre o coeficiente de carbonatação (Kc)

<i>Fatores</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
a/mc	28,6225	1	28,6225	10,94321	0,005178642	4,60011
MPa	3083,859	1	3083,859	948,2442	2,90944E <sup>-14</sup>	4,60011

Fonte: Autoria própria

Nota: SQ = soma quadrada; gl = grau de liberdade; MQ = média quadrada; F = valor calculado; valor-p = significância; F crítico = valor tabelado para nível de significância 0,05.

Conforme observa-se na Tabela 5.6 a relação água/materiais cimentícios (a/mc) e a resistência à compressão axial apresentaram significância em relação ao coeficiente de carbonatação, pois o valor de  $F > F_{crítico}$ . Sendo que a resistência à compressão axial apresentou-se altamente significativa, com valor- $P = 2,909E^{-14}$ , bem abaixo do valor –  $P$  utilizado (0,05), demonstrando que a resistência do concreto influi consideravelmente no coeficiente de carbonatação ( $K_c$ ) para as misturas estudadas.

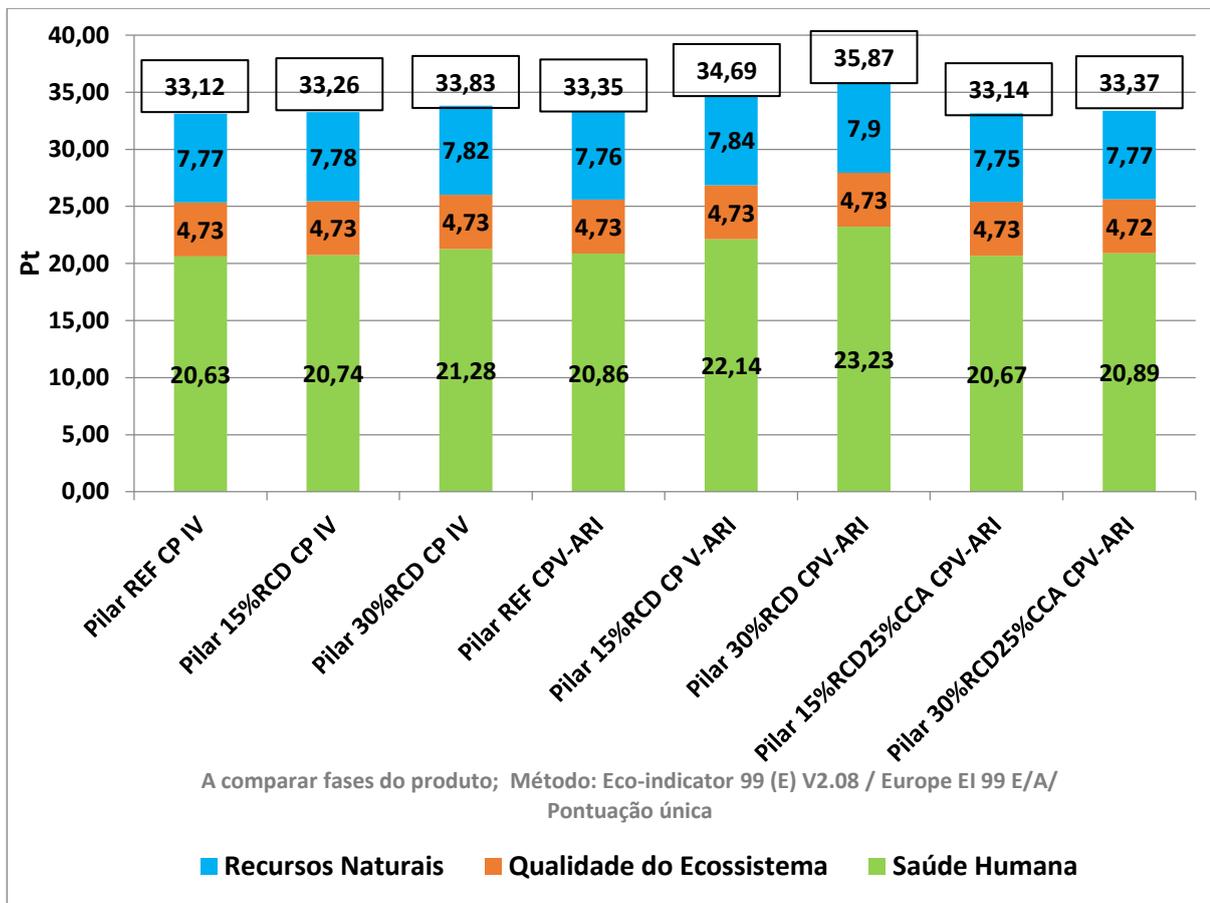
## 5.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Análise do Ciclo de Vida deu-se por meio de impactos totais do berço ao túmulo e impactos individuais.

### 5.6.1 Impactos totais: do berço ao túmulo

Após inserir o inventários dos materiais no software SimaPro, realizou-se a análise dos impactos para cada uma das alternativas de pilar estudados. A Figura 5.5 apresenta os resultados dos impactos sobre a saúde humana, ecossistemas e recursos naturais, e em seguida a soma de cada conjunto deles, em unidade de Pt (milésimo da carga ambiental média anual de um cidadão europeu).

Figura 5. 5 - Três categorias de impactos por pilar



Fonte: Adaptado do software SimaPro

Apesar da análise matemática mostrar que os maiores impactos foram causados pelos pilares 15% e 30% de RCD e cimento CPV-ARI, resultando em 34,69 e 35,87 Pt, respectivamente (Figura 5.5). Também esses pilares foram os que tiveram as menores relações água/materiais cimentícios, 0,4 e 0,3, respectivamente, e consequentemente os maiores consumos de cimento, o que pode ser uma das respostas pelo aumento dos impactos já que esses traços possuem substituições do agregado graúdo natural pelo RCD. Ainda em relação ao mesmo tipo de cimento, o pilar que resultou em menores impactos totais foi o 15% de RCD e 25% de cinza de casca de arroz, com 34,14 Pt. Com o cimento CPIV, o pilar que apresentou menor impacto total foi o REF (33,12 Pt), e percebe-se que as substituições com 15 e 30% de RCD aumentaram os impactos para 33,26 e 33,83, respectivamente. Esses dois últimos pilares também tiveram aumento do consumo de cimento, que possivelmente contribuíram para o aumento dos impactos em relação ao pilar REF. Observa-se que a média geral entre os oito traços foi 33,83 Pt e o desvio padrão 0,9746, o que confere um coeficiente de variação de apenas 2,88%. Logo, as diferenças entre todos os valores são muito pequenas

para chegar-se a conclusão sobre qual é o traço mais indicado. Tal escolha dependeria das disponibilidades locais de cimento (CPIV ou CPV) e da CCA. Análise mais correta seria o cálculo unitário dos impactos por unidade de resistência e por ano de vida útil, o que se fará a seguir.

Estudos realizados por Silva (2014) e Lamberti (2015), com composições de pilares um pouco diferentes desta pesquisa, mas com as mesmas análises de impactos, mostram que a saúde humana também foi a mais afetada, seguida pelos recursos naturais.

Para realizar uma análise mais completa desses resultados, elaborou-se a Tabela 5.7 com o custo total e impactos totais por pilar analisado, em que o custo e os impactos foram divididos pela resistência à compressão axial aos 28 dias de idade, em MPa, e a vida útil, em anos, sendo que os impactos ainda foram multiplicados por um valor estabelecido ( $10^4$ ) para melhorar a compreensão. A comparação dos resultados deu-se através de índices, em que adotou-se o pilar REF CPV-ARI como referência, já que os demais trabalhos do grupo de estudos, Silva (2014) e Lamberti (2015) tomaram como referência o pilar com CPV e maior resistência. Ainda calculou-se as médias, desvios padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos resultados dos pilares com CPIV e CPV-ARI.

Tabela 5. 7 - Impactos totais, unitários, índices e custos

Pilar	Impactos totais (Pt.pilar <sup>-1</sup> )	Impactos unitários (Pt.MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> .10 <sup>4</sup> )	Índices dos Impactos unitários	Custo Total (R\$.pilar <sup>-1</sup> )	Custo unitário (R\$.MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Índice do custo unitário
Ref CPIV	33,12	73,11	91,15	4906,3	1,08	102,86
15%RDCPIV	33,26	98,11	122,32	3845,1	1,13	107,62
30%RDCPIV	33,83	200,7	250,22	2221,4	1,32	125,71
Média / DP CV (%)	33,40 / 0,38 1,14	123,97 / 67,61 54,54			1,18 / 0,13 11,02	
<b>Ref CPV</b>	<b>33,35</b>	<b>80,21</b>	<b>100</b>	<b>4383,1</b>	<b>1,05</b>	<b>100</b>
15%RDCPV	34,69	76,07	94,84	2577,4	0,56	53,33
30%RDCPV	35,87	79,45	99,05	2608,1	0,58	55,24
15%RCD25CCACPV	33,14	66,95	83,47	4848,8	0,98	93,33
30%RCD25CCACPV	33,37	185,64	231,14	1319,2	0,61	58,09
Média / DP CV (%)	34,08 / 1,17 3,43	97,66 / 49,46 50,64			0,76 / 0,24 31,58	

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que o menor impacto unitário ocorreu com o pilar 15% de RCD e CCA, com o cimento CPV-ARI, que resultou em  $66,95 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ , representando 16,53% menor que o traço REF. Para o mesmo cimento, o pilar que teve o maior impacto unitário foi o 30% RCD e CCA ( $185,64 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), o que contribuiu para esse considerável aumento dos impactos em relação aos demais pilares foi a vida útil menor (56 anos), sendo que este pilar não necessitou de pintura para prolongá-la, pois o valor foi superior a vida útil mínima de 50 anos.

Em relação aos impactos unitários com o cimento CPIV, tem-se o menor impacto com o pilar REF ( $73,11 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), já com o aumento das substituições de 15 para 30% aumentou-se os impactos de 98,11 para  $200,7 \text{ Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ . Vale frisar que a contribuição para esse aumento também pode ter sido o maior consumo de cimento, que passou de  $131,31 \text{ kg/m}^3$  para  $166,31 \text{ kg/m}^3$ .

Percebe-se pela Tabela 5.7 que o melhor índice para o cimento CPIV foi o REF (91,15), seguido pelo pilar 15 e 30% de RCD (122,32 e 250,22), respectivamente. Já para o cimento CPV, os melhores índices foram 15% RCD e CCA com 83,47, seguido pelo pilar 15% de RCD, com 94,84. Tendo como pior índice o pilar 30% RCD e CCA, com valor de 231,14.

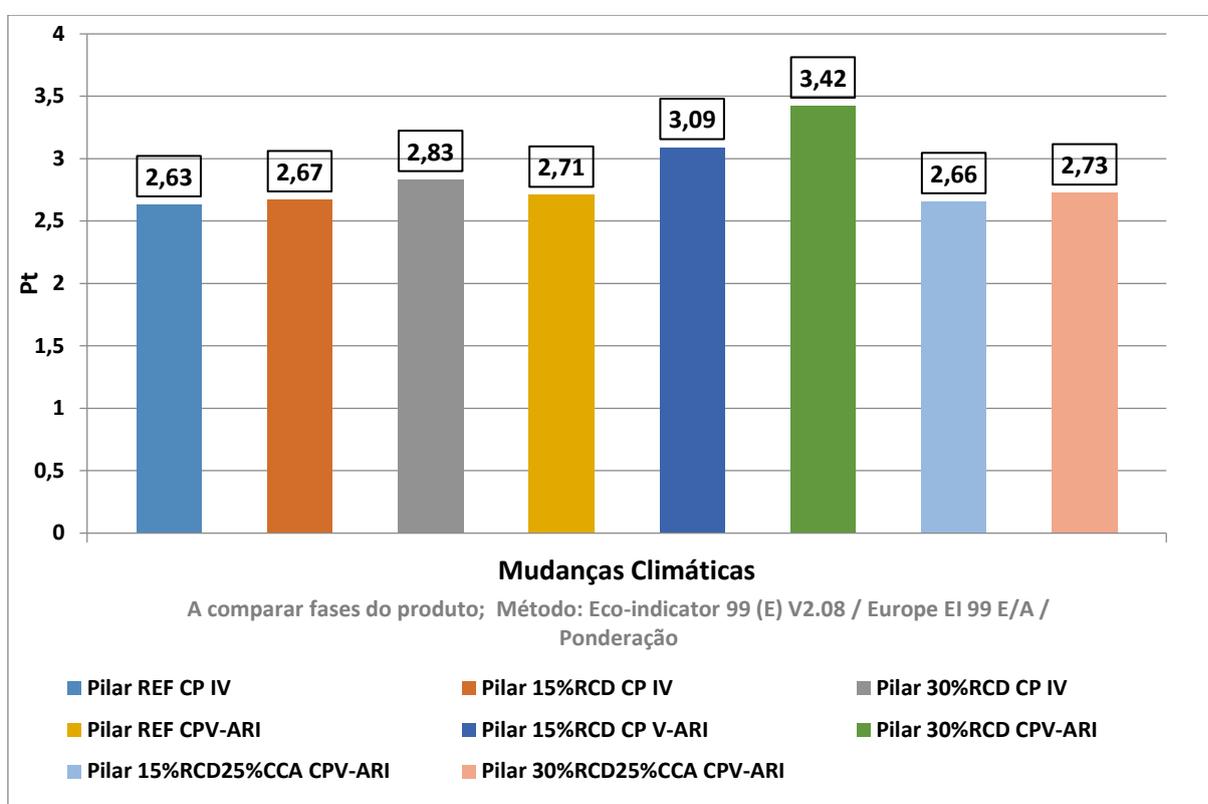
### 5.6.2 Impactos individuais

Segundo a ACV-m para melhor apresentar os impactos, analisa-se cada um deles individualmente. Como o software SimaPro apresenta várias categorias de impactos, mudanças climáticas, consumo de recursos naturais, consumo de energia, geração de resíduos, consumo de água, emissão de carcinógenos, ecotoxicidade, radiação, impacto sobre a camada de ozônio, uso do solo, entre outros. Fez-se uma análise dos cinco primeiros impactos considerados os mais relevantes de acordo com a metodologia da análise do ciclo de vida modular (ACV-m) conforme o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014), também foi calculado o dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ), em separado dos demais, como balizamento da pegada de carbono.

### 5.6.2.1 Mudanças climáticas

A Figura 5.6 apresenta as mudanças climáticas para cada uma das alternativas de pilar, em relação aos pilares com o cimento CPIV percebe-se que resultou em menor impacto o pilar REF, com 2,63 Pt, já quando substituiu-se 15 e 30% de RCD houve um aumento que passou para 2,67 e 2,83 Pt, respectivamente. Para os pilares com cimento CPV-ARI os piores resultados também foram com 15 e 30% de RCD (3,09 e 3,42 Pt), respectivamente. E o pilar que apresentou o menor impacto foi o 15% de RCD e CCA, com 2,66 Pt.

Figura 5. 6 - Mudanças climáticas



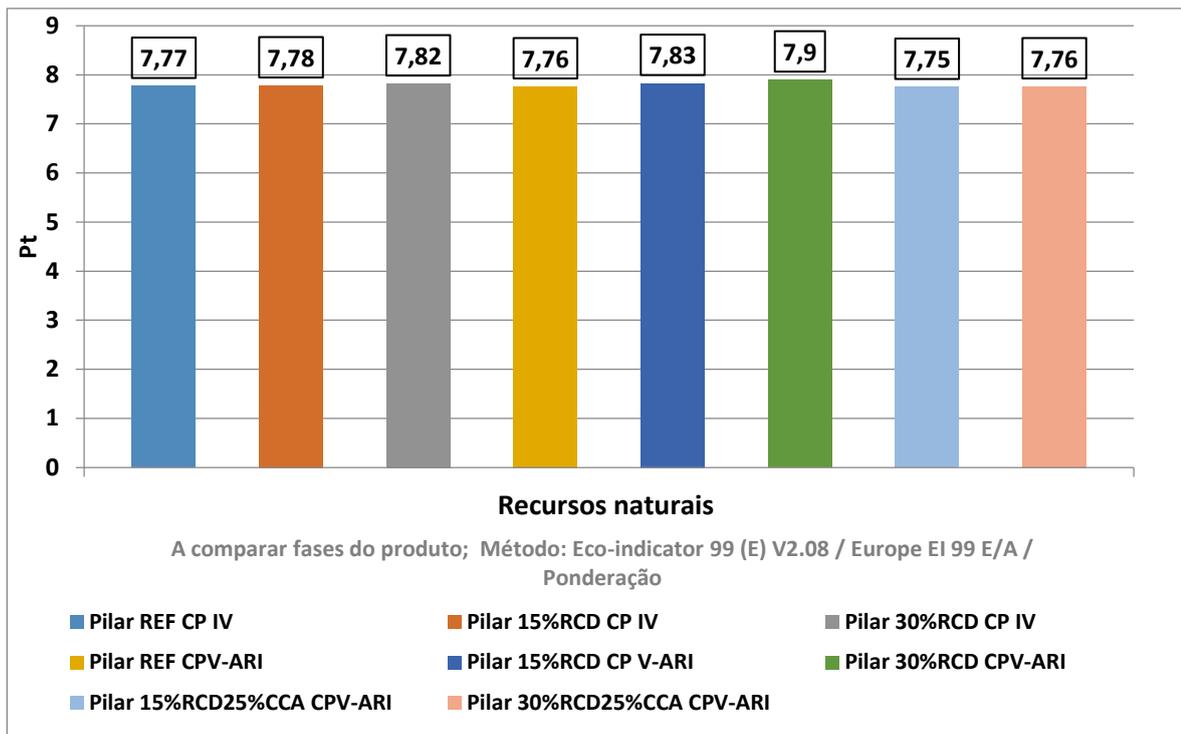
Fonte: Adaptado do software SimaPro

### 5.6.2.2 Consumo de recursos naturais

Em relação a esse tipo de impacto tem-se os resultados apresentados na Figura 5.7. Observa-se que os pilares com cimento CPIV tiveram como menor resultado o REF, com 7,77 Pt, em seguida o 15% RCD praticamente não teve diferença (7,78 Pt), e o 30% RCD sofreu um pequeno aumento, ficando em 7,82 Pt. Quando analisa-se os pilares com o cimento CPV tem-se como menor impacto o pilar com 15% RCD e CCA, com 7,75 Pt, em seguida os

pilares REF e 30% de RCD e CCA, ambos com 7,76 Pt, tendo como pior resultado o pilar com 30 de RCD, o que contribuiu para que este pilar apresentasse os piores resultados com certeza foi o seu maior consumo de cimento em relação aos demais pilares.

Figura 5. 7 - Consumo de recursos naturais



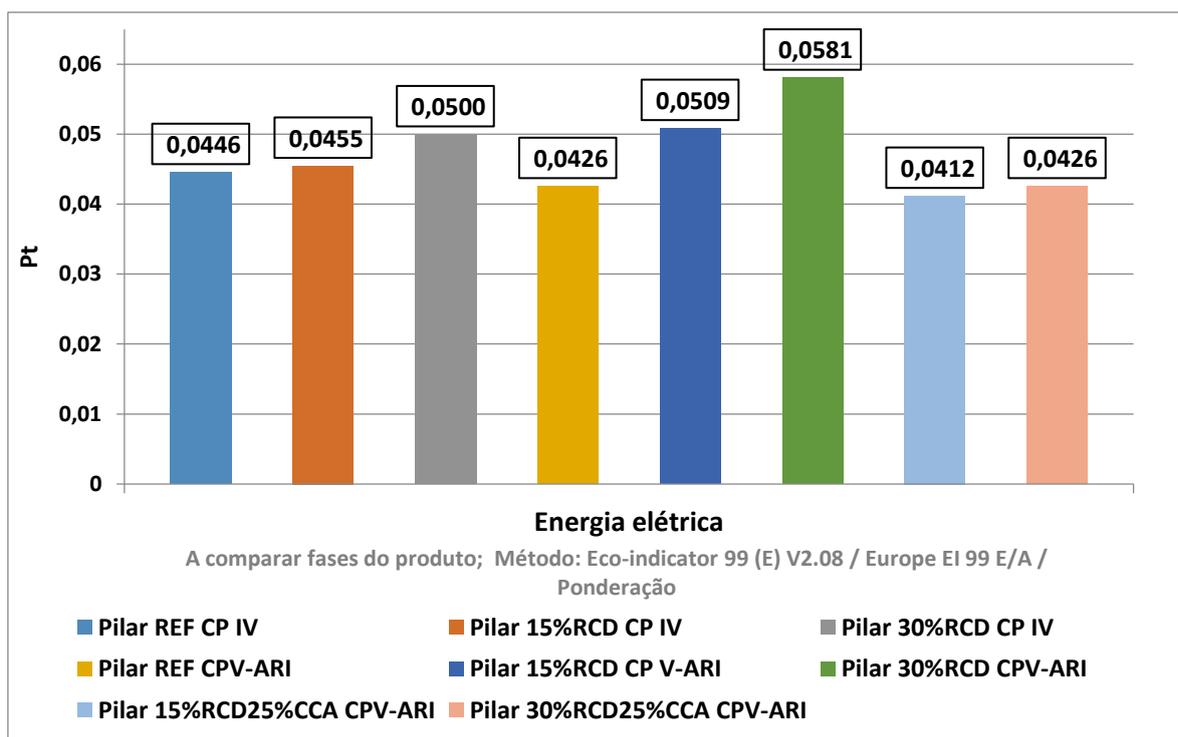
Fonte: Adaptado do software SimaPro

### 5.6.2.3 Consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica está representado pela Figura 5.8, percebe-se que o maior impacto resultou com 30% de RCD e cimento CPV-ARI (0,0581 Pt), em seguida tem-se o 15% de RCD para o mesmo tipo de cimento com 0,0509 Pt, mas deve-se levar em consideração que estes traços não necessitaram de pintura para prolongar a vida útil, bem como o 30% RCD e CCA, que resultou em 0,0426 Pt. Já o menor impacto ocorreu com o pilar 15% RCD e CCA, que necessitou de pintura para aumentar a vida útil que era de 29 anos.

Em relação ao cimento CPIV, o menor valor foi o REF (0,0446 Pt), em seguida para 15 e 30% de RCD teve-se um pequeno aumento, ficando em 0,0455 e 0,05 Pt, respectivamente.

Figura 5. 8 – Consumo de energia elétrica

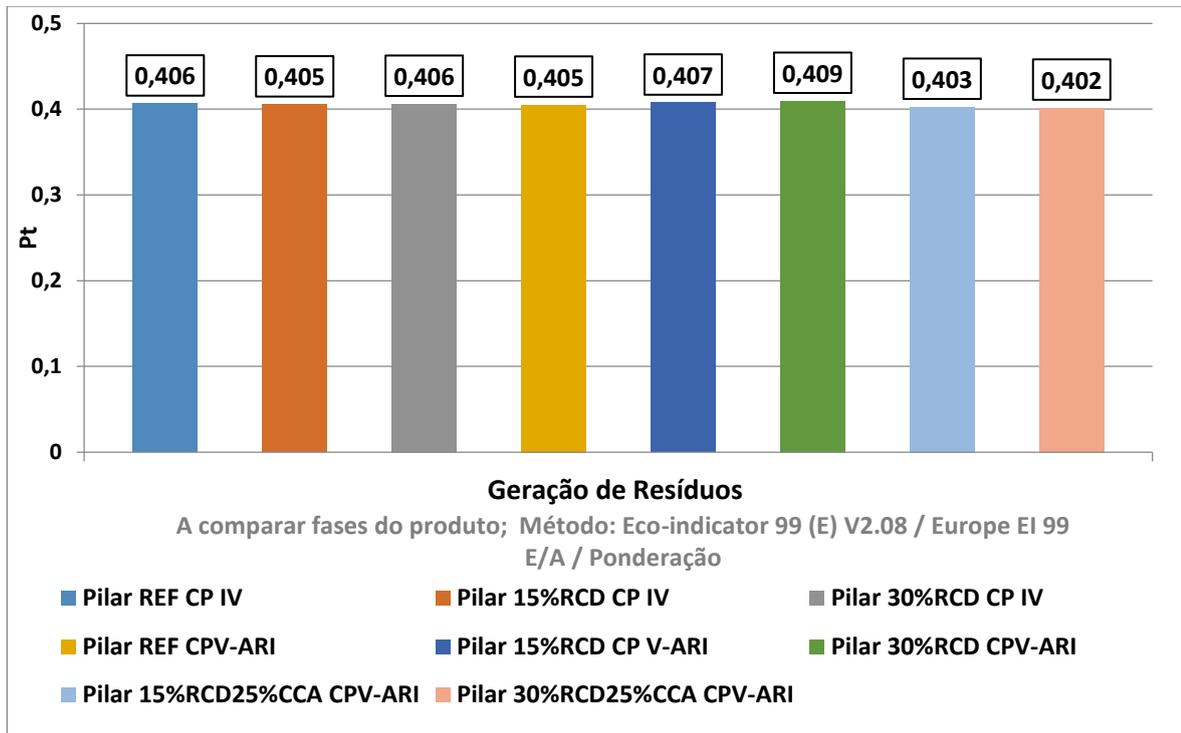


Fonte: Adaptado do software SimaPro

#### 5.6.2.4 Geração de resíduos

A Figura 5.9 apresenta os resultados quanto a geração de resíduos, em que os valores dos diferentes pilares foram bastante próximos. Para os pilares com CPIV praticamente não houve variação, ficando com 0,406 Pt. Em relação ao grupo CPV-ARI, os pilares responsáveis pela maior geração de resíduos foram o 15 e 30% RCD, com 0,407 e 0,409 Pt, respectivamente. E os menores valores foram os pilares 15 e 30% de RCD e CCA, 0,403 e 0,402, respectivamente. O pilar REF resultou em 0,405 Pt, sendo o terceiro maior gerador de resíduos entre os pilares do mesmo grupo de cimento.

Figura 5.9 - Geração de Resíduos



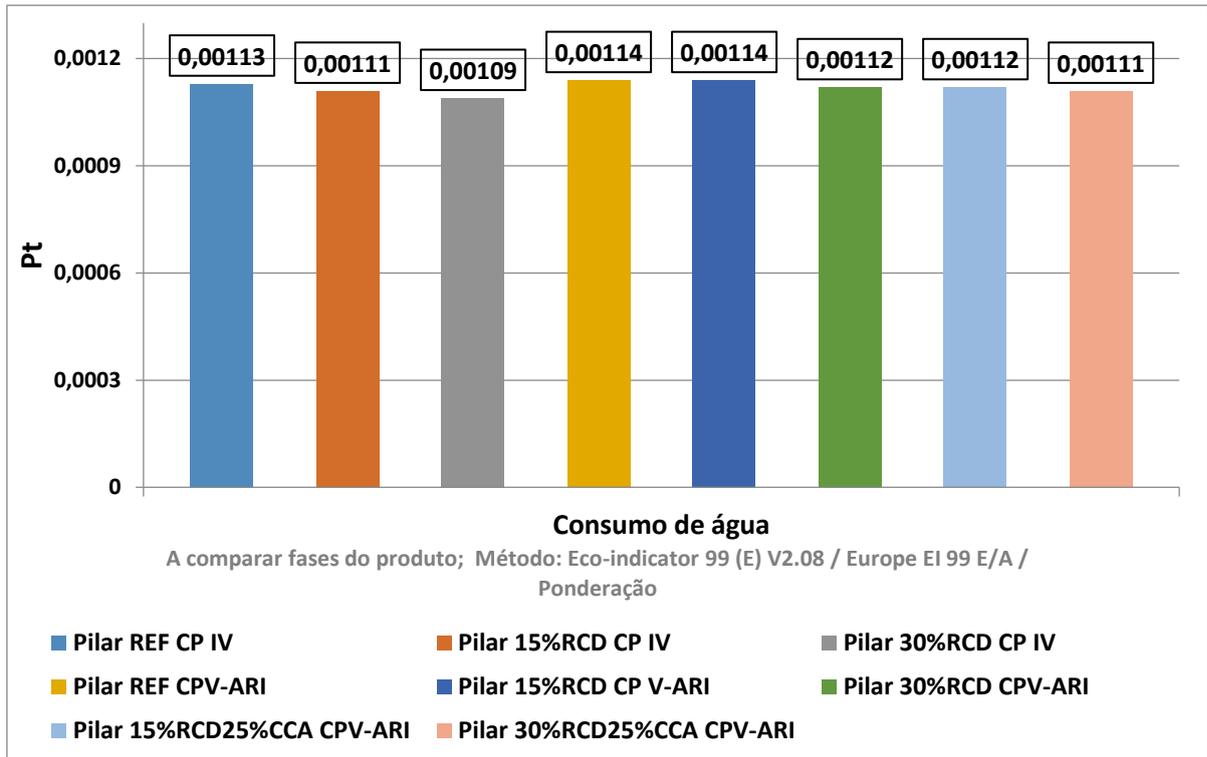
Fonte: Adaptado do software SimaPro

#### 5.6.2.5 Consumo de água

O consumo de água está representado pela Figura 5.10, que mostra os diferentes resultados para os tipos de pilares, percebe-se que esses consumos tem pouca influência sobre os impactos totais ocasionados por cada um dos pilares. Em relação ao grupo com o cimento CPIV tem-se o maior consumo de água para o pilar REF (0,00113 Pt), seguido pelos outros dois pilares 15 e 30% de RCD com 0,00111 e 0,00109 Pt, respectivamente. Esses três pilares necessitam de pintura para prolongar a vida útil, não necessitando de lavagens, porém as diferentes idades e relação água/materias cimentícios (a/mc) devem ter contribuído para esses diferentes consumos de água.

Em relação ao grupo de pilares com o cimento CPV-ARI tem-se uma pequena variação entre eles, o menor consumo foi com o pilar 30% de RCD e CCA (0,00111 Pt), seguido pelos pilares 15 e 30% de RCD com o mesmo resultado de 0,00112 Pt, e os pilares REF e 15% de RCD apresentaram os maiores valores de 0,00114 Pt. Dentre as diferentes alternativas de pilar, os que não necessitam de pintura para prolongar a vida útil foram os 15 e 30% de RCD e o 30% de RCD e CCA. Porém as diferentes relações água/materias cimentícios devem ter influenciado nos resultados.

Figura 5. 10 - Consumo de água



Fonte: Adaptado do software SimaPro

#### 5.6.2.6 Pegada de carbono

Como explicado no capítulo anterior, foram realizados os cálculos de gás carbônico equivalente ( $CO_{2eq}$ ), em que as substâncias obtidas por meio do inventário do software SimaPro 8.4 foram multiplicadas pelos seus fatores de relevância de acordo com a Tabela 4.13, e em seguida somados ( $\Sigma_{substância.fator}$ ) para cada uma das opções de pilar. No entanto, reduziu-se desse valor o  $CO_2$  absorvido por cada pilar durante seu ciclo de vida (vida útil provável), como pode ser observado na Tabela 5.8.

Tabela 5. 8 - Gás carbônico equivalente (CO<sub>2eq</sub>)

Pilar	$\Sigma(\text{substância.fator})$ (kg.pilar <sup>-1</sup> )	Absorção de CO <sub>2</sub> (kg.pilar <sup>-1</sup> )	CO <sub>2eq</sub> (kg.pilar <sup>-1</sup> )
TRIV	471,39	8,94	462,45
15RCDIV	474,11	9,57	464,54
30RCDIV	485,02	12,12	472,90
TRV	476,69	10,2	466,49
15RCDV	502,5	16,21	486,29
30RCDV	524,77	21,41	503,36
15RCD25CAAV	473,43	9,42	464,01
30RCD25CAAV	478,25	10,55	467,7

Fonte: Autoria própria

Os pilares que tiveram maior gás carbônico equivalente foram os produzidos com cimento CP V-ARI, destacando-se os pilares 15RCDV e 30RCDV com CO<sub>2eq</sub> de 486,29 kg.pilar<sup>-1</sup> e 503,36 kg.pilar<sup>-1</sup>, respectivamente. Resultado este que deve-se principalmente pelo maior consumo de cimento na produção do concreto, já que esses dois traços tiveram as menores ralações água/materias cimentícios (a/mc), devido a diminuição da resistência ocasionada pela substituição do agregado graúdo pelo RCD e o dimensionamento considerando igualdade de resistências (25MPa).

### 5.6.3 Análise unitária dos impactos individuais

Assim como nos impactos totais calculou-se os impactos unitários, dividindo-os pela resistência à compressão axil (MPa<sup>-1</sup>) e pela vida útil (ano<sup>-1</sup>), multiplicando por 10<sup>4</sup>, valor este estabelecido para apresentar com maior clareza entre os resultados, com os impactos individuais fez-se o mesmo, que estão representados na Tabela 5.9, onde tem-se também os índices em relação ao pilar referência adotado (REF CPV-ARI) de cada um dos impactos estudados.

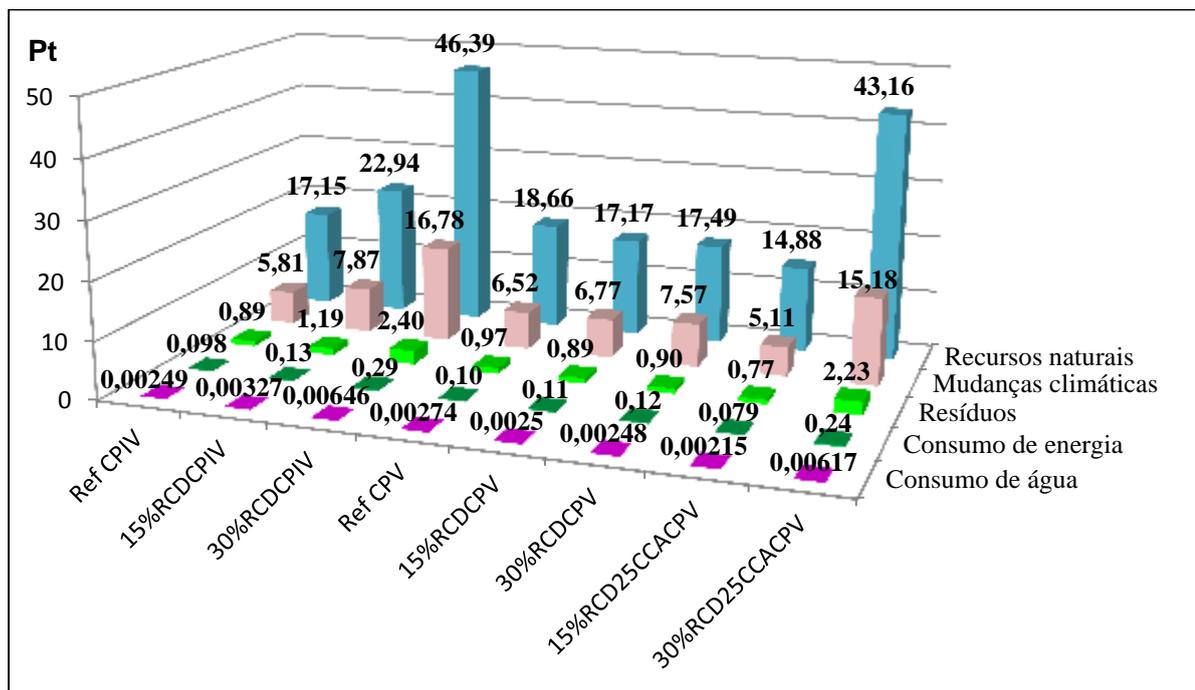
Tabela 5. 9 - Impactos individuais unitários e índices

<b>Impacto individual</b>	<b>Unidade</b>	<b>Ref CPIV</b>	<b>15%RCD CPIV</b>	<b>30%RCD CPIV</b>	<b>Ref CPV</b>	<b>15%R CDCP V</b>	<b>30%RCD CPV</b>	<b>15%RCD 25CCAC PV</b>	<b>30%RCD25CCA CPV</b>
Mudanças climáticas	Pt.MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> .10 <sup>4</sup>	5,81	7,87	16,78	<b>6,52</b>	6,77	7,57	5,11	15,18
Índice	-	89,11	120,71	257,36	<b>100</b>	103,83	116,1	78,37	232,82
Recursos naturais	Pt.MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> .10 <sup>4</sup>	17,15	22,94	46,39	<b>18,66</b>	17,17	17,49	14,88	43,16
Índice	-	91,9	122,93	248,61	<b>100</b>	92,02	93,73	79,7	231,3
Consumo de energia	Pt.MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> .10 <sup>4</sup>	0,098	0,13	0,29	<b>0,10</b>	0,11	0,12	0,079	0,24
Índice	-	98	130	290	<b>100</b>	110	120	79	240
Resíduos	Pt.MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> .10 <sup>4</sup>	0,89	1,19	2,40	<b>0,97</b>	0,89	0,90	0,77	2,23
Índice	-	91,75	122,68	247,42	<b>100</b>	91,75	92,78	79,38	229,89
Consumo de água	Pt.MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> .10 <sup>4</sup>	0,00249	0,00327	0,00646	<b>0,00274</b>	0,0025	0,00248	0,00215	0,0061
Índice	-	90,87	119,34	235,77	<b>100</b>	91,24	90,51	78,47	225,18
Pegada de carbono	CO <sub>2eq</sub> .MPa <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> .10 <sup>4</sup>	1020,86	1370,32	2805,53	<b>1121,91</b>	1066,42	1114,86	891,47	2601,8
Índice	-	90,99	122,14	250,06	<b>100</b>	95,05	99,37	79,46	231,91

Fonte: Autoria própria

Ao fazer os cálculos unitários, tanto dos impactos totais como dos individuais, consegue-se ter valores mais claros para que se possa avaliar a sustentabilidade de uma certa unidade funcional. Para apresentar esses dados de maneira mais fácil de ser compreendida, elaborou-se o gráfico da Figura 5.11, em que estão representados os cinco primeiros itens analisados na Tabela 5.9. Sendo considerados os processos de construção do pilar, manutenção (pintura ou lavagem), desconstrução/reciclagem, transporte e manejo do RCD.

Figura 5. 11 - Impactos individuais unitários



Fonte: Autoria própria

Observa-se uma ordem dos maiores impactos individuais unitários para os menores, em que os recursos naturais são os de maior importância, seguidos pelas mudanças climáticas, resíduos, consumo de energia e água. Esses dois últimos são os de menores impactos para todas as alternativas de pilares analisadas. A categoria de geração de resíduos também apresenta-se com valores menores, em que os pilares com maiores impactos foram o 30%RCD CPiV e o 30%RCD25CCACPV, que apresentam 2,40 e 2,23  $Pt.MPa^{-1}.ano^{-1}.10^4$ , respectivamente. Nos estudos de Lamberti (2015) observa-se essa mesma ordem de grandeza dos diferentes tipos de impactos analisados, em que os recursos naturais apresentaram-se em torno de 3,5 vezes maiores que as mudanças climáticas.

Em relação aos pilares com o cimento CPiV, percebe-se que os piores resultados foram quando substituiu-se o agregado natural pelo RCD, e que os impactos aumentaram de maneira proporcional as substituições, ou seja, aumentando-se as substituições de 15 para 30% de agregados natural pelo RCD, aumentou-se os impactos para as cinco categorias analisadas, e também em relação a pegada de carbono. O pilar com 30% de RCD apresentou impacto sobre os recursos naturais cerca de 2,70 vezes maior que o pilar sem substituição, para o mesmo tipo de cimento. Pelas análises, percebe-se que o consumo de cimento é o principal fator que contribui para o aumento dos impactos nas categorias estudadas, já que ao substituí-lo o agregado natural pelo residual a resistência desse concreto reduziu em relação

ao concreto sem substituições, o que fez com que diminuísse a relação água/materiais cimentícios e conseqüentemente aumentasse o consumo de cimento para esses pilares.

Ao considerar os pilares produzidos com o cimento CPV-ARI percebe-se uma diminuição de alguns impactos analisados em relação ao pilar sem substituições. Em relação as mudanças climáticas o pilar com 15% de RCD e CCA apresentou o menor impacto (5,11 Pt.  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), já o pior resultado foi com o pilar 30% de RCD e CCA (15,18 Pt.  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), o que contribuiu para esse grande aumento de impacto individual foi a idade, sendo que este último não necessitou de pintura para prolongar a vida útil, tendo como tempo estimado teórico e tempo provável 56 anos. Ao analisar a categoria de recursos naturais para o mesmo grupo de pilares, tem-se uma realidade semelhante com as mudanças climáticas, pois o menor impacto foi apresentado pelo pilar 15% RCD e CCA (14,88  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), e o pior com o pilar 30% de RCD e CCA (43,16 pilar 30% de RCD e CCA), valor este cerca de 2,3 vezes maior que o pilar REF CPV (sem substituições), que apresentou 18,66  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ .

Quanto a pegada do carbono  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  para os pilares com cimento CPIV, percebe-se os mesmos acontecimentos que nas demais categorias de impactos, em que o pilar 30% de RCD apresentou o maior valor (2805,53  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), sendo que o REF apresentou  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  de 1020,86  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ . Com o cimento CPV conseguiu-se diminuir o  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  na maioria das alternativas de pilar analisadas, o menor valor foi obtido pelo pilar 15% de RCD e CCA, com 891,47  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ , já o maior valor apresentado foi pelo pilar 30% de RCD e CCA (2601,8  $\text{Pt.MPa}^{-1}.\text{ano}^{-1}.10^4$ ), vale frisar que esse aumento deve-se principalmente pela menor vida útil desse pilar (56 anos) em relação aos demais.

Ao optar por pilares com diferentes tipos de cimentos (CPIV e CPV), os resultados diferiram bastante, e pode-se afirmar que os pilares com o CPV resultaram em menores valores de impactos nas categorias individuais em que foram analisados.

## 5.7 ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS SUSTENTABILIDADE X CUSTO

Para conseguir determinar qual a melhor opção de pilar estudada, quanto a sustentabilidade e ao custo (ACV e CCV), foi necessário reunir esses valores através dos índices calculados anteriormente e realizar a média geométrica entre eles, sendo que de acordo com Ha, Kwak e Lee (2006) esta é a melhor maneira para realizar a integração. A opção pela média geométrica dos índices dá-se pelo fato deles serem adimensionais, já que os impactos estão calculados em Pt (milésimo da carga ambiental de um cidadão europeu) e o

custo em Real (R\$). A média geométrica é dada através da raiz quadrada do produto do índice dos impactos unitários pelo índice do custo unitário (quanto menor a média melhor é o resultado), conforme apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5. 10 - Média geométrica dos índices de impactos e custos

<b>Pilar</b>	<b>Índices dos Impactos unitários (Ia)</b>	<b>Índices do custo unitário (Ic)</b>	<b>MG = (Ia.Ic)<sup>0,5</sup></b>
Ref CPIV	91,15	102,86	96,8
15%RDCPIV	122,32	107,62	114,7
30%RDCPIV	250,22	125,71	177,4
Média / desvio padrão (CPIV) Coeficiente de variação (%)			129,6 / 42,3 32,6
<b>Ref CPV</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
15%RDCPV	94,84	53,33	71,1
30%RDCPV	99,05	55,24	74,0
15%RCD25CCACPV	83,47	93,33	88,3
30%RCD25CCACPV	231,14	58,09	115,9
Média / desvio padrão (CPV) Coeficiente de variação (%)			89,8 / 18,6 20,7
Variação CPV x CPIV (%)			- 30,71

Fonte: Autoria própria

De acordo com a Tabela 5.10 os pilares com o cimento CPIV não tiveram ganhos na relação sustentabilidade x custo quando substituíam agregados reciclados, pois a média geométrica do traço Ref CPIV (96,8%) foi a menor entre eles, obtendo-se um aumento com a substituição do agregado graúdo natural pelo RCD, em que o pilar 15 e 30% de RCD resultaram em 114,7 e 177,4%, respectivamente. Também calculou-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para esse grupo de pilares, sendo que este último apresentou um valor bem alto, pois a diferença entre as médias geométricas foram consideráveis.

Observa-se que os pilares do grupo de cimento CPV-ARI, obtiveram média geométrica menor para a maioria dos pilares com substituições de RCD e CCA. O melhor

resultado sustentabilidade x custo foi o pilar 15% de RCD, com média geométrica de 71,1. Em seguida os pilares 30% de RCD e 15% de RCD + CCA obtiveram resultados favoráveis quanto ao pilar REF (100), com média geométrica de 74,0 e 88,3, respectivamente. O único pilar que apresentou-se desfavorável em relação ao grupo de pilares foi o 30% de RCD + CCA (115,9), representando média geométrica 15,9% acima do pilar REF, esse resultado já era esperado devido as demais análises realizadas anteriormente. No entanto, Blengini e Garbarino (2010) provaram através de seus estudos sobre o papel dos agregados reciclados em misturas sustentáveis que a reciclagem é economicamente e ambientalmente sustentável em comparação com extração de pedreiras, sendo que os agregados reciclados podem desempenhar um papel positivo na mistura de materiais sustentáveis.

A opção de um cimento CPV mostra um ganho na relação ACV x CCV de 30,71% em comparação com o cimento CPIV, quando utiliza-se resíduos de construção e demolição como substituintes parciais do agregado natural, e em alguns casos quando substitui-se parcialmente o cimento pela cinza de casca de arroz. Já nos estudos de Lamberti (2015) que pesquisou diferentes tipos de cimento e resistências características, evidencia-se que o aumento de resistência do concreto de 30MPa para 50MPa trouxe maiores benefícios para essa relação, e o tipo de cimento não teve grande influência nos resultados.

Nesta pesquisa a escolha pelo tipo de cimento mostrou que a substituição do agregado gráudo natural pelo RCD é uma alternativa viável na relação ACV x CCV com a utilização do cimento CPV-ARI em relação ao CPIV, embora as diferenças, na maioria dos casos entre os tipos de agregados e/ou de cimentos tenham sido pequenas.

O modo de análise da ACV e CCV estão sujeitas a variáveis a partir da formação dos fatores que influem nos impactos individuais e no seu cálculo. E acordo com Langdon (2007b) essa análise é considerada um processo iterativo, dependendo de circunstâncias específicas, fazendo com que muitas vezes sejam necessárias iterações futuras.

Para apresentar evidências mais concretas sobre os resultados, realizou-se a Análise de Variância (ANOVA) da influência do teor de agregado reciclado e do tipo de cimento utilizado sobre a média geométrica dos índices de impactos e custos (Tabela 5.11).

Tabela 5. 11- ANOVA da influência dos fatores sobre a média geométrica dos índices de impactos e custos

<b>Fatores</b>	<b><i>SQ</i></b>	<b><i>gl</i></b>	<b><i>MQ</i></b>	<b><i>F</i></b>	<b><i>valor-P</i></b>	<b><i>F crítico</i></b>
Teor de RCD	5502,11	7	786,0157	0,182603	0,981436948	3,500464
Tipo de cimento	3894,16	7	556,3086	0,095497	0,997161819	3,500464

Fonte: Autoria própria

Nota: *SQ* = soma quadrada; *gl* = grau de liberdade; *MQ* = média quadrada; *F* = valor calculado; *valor-p* = significância; *F crítico* = valor tabelado para nível de significância 0,05.

As evidências constatadas aqui são restritas ao estudo de caso, em que não é possível chegar-se a conclusão geral porque os resultados obtidos foram estatisticamente não significantes ( $F < F_{\text{crítico}}$ ).

Analisando a Tabela 5.10 pode-se dizer que a tendência dos melhores resultados são para o cimento CPV com até 15% de RCD (índices maiores diminuem a relação *a/mc* e aumentam o consumo de cimento, diminunindo a sustentabilidade).

## 6 CONCLUSÕES

Foi realizada a avaliação das misturas de concreto com dois teores de substituições do agregado natural pelo residual, em que avaliou-se parâmetros como: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade longitudinal e durabilidade, utilizando-se dois tipos de cimento (CPIV e CPV-ARI) e pozolana (cinza de casca de arroz). A partir dessas análises percebeu-se que as substituições de agregado graúdo natural por resíduos de construção e demolição ocasionaram a diminuição tanto da resistência à compressão como do módulo de elasticidade, de maneira proporcional a substituição, ou seja, aumentando 15% para 30%, diminuiu-se as propriedades analisadas em 7,06% e 2,29% para o CPIV, respectivamente e 7,67% e 12,43% para o CPV - ARI, respectivamente. No momento em que substituiu-se parcialmente o cimento pela cinza de casca de arroz pode-se perceber que os resultados para as propriedades analisadas foram semelhantes a mistura de referência, existindo desta forma uma compensação desses resultados que foram afetados pelas diferentes características dos RCD. Quanto a durabilidade, obteve-se resultados variados entre os traços analisados, pois como o dimensionamento deu-se em igualdade de resistências, o consumo de materiais, principalmente do cimento foi bastante diferenciado, ocorrendo grande variação da relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ) de 0,3 a 0,64, que contribuiu para a ausência do fenômeno de carbonatação em algumas misturas em que utilizou-se o cimento CPV-ARI, com relações  $a/mc$  consideravelmente baixas (0,3 e 0,4).

A análise da sustentabilidade englobou o ciclo de vida completo da unidade funcional estabelecida, ou seja, do “berço ao túmulo”. Nesta ocasião analisaram-se oito alternativas de pilares, sendo que alguns dados do inventário foram obtidos através de pesquisas já realizadas pelo grupo GEPECON, e outros diretamente da biblioteca do *software* SimaPro. Desta forma, para realizar as análises dos impactos ambientais foi necessário estabelecer alguns parâmetros, como as classes de impactos que seriam analisadas, selecionando assim, as mudanças climáticas, recursos naturais, consumo de energia, geração de resíduos, consumo de água e pegada de carbono. Constatou-se para todas as classes de impacto analisadas que as misturas com o cimento CPIV e substituição do agregado natural pelo residual apresentaram-se desfavoráveis quando comparadas com a mistura referência, sendo que este acontecimento deve-se provavelmente pelo aumento do consumo de cimento para esses traços, já que os RCD diminuíram a resistência, e conseqüentemente foi necessário diminuir a relação  $a/mc$  para alcançar a igualdade de resistência estabelecida. Com o cimento CPV – ARI, os mais altos impactos individuais foram resultantes dos traços com 15 e 30% de RCD, fato que pode ser

explicado pelo mesmo motivo que aconteceu com as substituições quando utilizou-se o cimento CPIV. Ao analisar os impactos individuais unitários, os mais importantes e que tiveram maiores diferenças entre si foram os recursos naturais e as mudanças climáticas, já os impactos como geração de resíduos, consumo de água e energia não apresentaram diferenças significativas.

Para conseguir fazer a análise sustentabilidade x custo, foi necessário realizar a composição dos custos para cada alternativa de pilar, e para esclarecer melhor as análises realizou-se a análise unitária de cada uma, em que dividiu-se o custo total pela resistência (MPa) e pela vida útil (anos). Comparando-se quanto aos tipos de cimento, o CPIV resultou em maiores custos, tendo um aumento proporcional com o aumento das substituições de agregado natural pelo residual. Já em relação aos pilares com o cimento CPV – ARI, todos apresentaram menores custos comparando-se com o pilar referência. Desta forma, constatou-se que os pilares com cimento CPIV e RCD apresentaram-se desfavoráveis quando analisou-se o custo durante todo o seu ciclo de vida.

Com o objetivo de determinar qual seria a melhor alternativa de pilar estudada quanto a sustentabilidade e ao custo (ACV e CCV), realizou-se uma integração com esses resultados, em que através da média geométrica se determinou que a melhor opção entre os diferentes pilares é a utilização de cimento CPV – ARI e 15% de RCD, que apresentou média geométrica 28,9% menor que o traço tomado como referência (100).

Portanto, ao agrupar os diversos resultados concluiu-se que:

- I. Os pilares foram dimensionados em igualdade de resistência acabou afetando diversos resultados, como a profundidade de carbonatação, vida útil, consumo de cimento e, geração de impactos ambientais.
- II. O tipo de cimento teve influência em todas as propriedades analisadas, principalmente na análise global relacionando a ACV x CCV o ganho na utilização do CPV-ARI foi de 30,71% em relação ao CPIV.
- III. A utilização do cimento CPIV juntamente com resíduos de construção e demolição (RCD) não apresentou-se viável em relação a sustentabilidade e ao custo, pois aumentou os impactos ambientais, principalmente o consumo médio de recursos naturais unitários em 102,12% e as mudanças climáticas em 112,13% comparando-se com a mistura sem substituições. Também o custo unitário teve um aumento médio de 16,67%.

- IV. As pozolanas compensaram a queda de resistência à compressão dos concretos ocasionada pelos agregados residuais. Quando substituiu-se somente o RCD obteve-se uma queda média de resistência para os 91 dias de idade do concreto de 10,23%, já com a substituição parcial do cimento pela cinza de casca de arroz essa queda diminuiu para 4,6%.
- V. A baixa relação água/materiais cimentícios ( $a/mc$ ) afetou a profundidade de carbonatação, fazendo com que algumas misturas apresentassem ausência desse fenômeno, como ocorreu com as misturas com 15 e 30% de RCD e CPV-ARI.
- VI. A substituição somente de RCD nas misturas não trouxe benefícios as propriedades do concreto, já com a utilização de pozolanas conseguiu-se compensar essas perdas. Porém quando analisou-se a sustentabilidade x custo a utilização de até 15% de RCD apresentou-se favorável com o CPV-ARI.
- VII. Os impactos ambientais totais e individuais foram afetados pelos diferentes consumos de cimento, percebendo-se que nas misturas analisadas o cimento foi o fator determinante sobre os impactos, em que alguns traços de concreto mesmo com substituição de agregados naturais por residuais apresentaram maiores impactos, devido ao maior consumo de cimento.

A sugestão para trabalhos futuros é que sejam realizadas análises com pilares dimensionados para diferentes resistências características e até mesmo sem igualdade de resistências. Que se busque substituir diferentes porcentagens de agregados naturais pelos residuais, com outros tipos de cimentos e pozolanas, analisando a vida útil não apenas através da carbonatação acelerada, e sim pelos demais agentes agressivos. E após a análise das diferentes misturas se faça também a integração sustentabilidade x custo, para escolher a melhor alternativa entre as estudadas.



## REFERÊNCIAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Pesquisa inédita revela o cenário do mercado brasileiro de concreto**, 2013. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>>. Acesso em: 13 de abril de 2016.
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2014**. Cap. 3. Acesso em 08/07/2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: 20 de maio de 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653/2015. **Materiais pozolânicos – Especificação**. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_. NBR 11579 - **Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. São Paulo; ABNT, 2013.
- \_\_\_. NBR 12653 - **Materiais pozolânicos — Requisitos**. São Paulo; ABNT, 2015.
- \_\_\_. NBR 12655 - **Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento. Procedimento**. ABNT, Rio de Janeiro. 2015.
- \_\_\_. NBR 15113 - **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes—Aterros—Diretrizes para projeto, implantação e operação**. ABNT, São Paulo. 2004.
- \_\_\_. NBR 15575-1: **edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais**. Rio de Janeiro; ABNT, 2013.
- \_\_\_. NBR 5733 - **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro; ABNT, 1991.
- \_\_\_. NBR 5736 – **Cimento Portland pozolânico**. São Paulo; ABNT, 1999.
- \_\_\_. NBR 5738 - **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro; ABNT, 2016.
- \_\_\_. NBR 5739 - **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- \_\_\_. NBR 6118 - **Projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_. NBR 7211 – **Agregados para concreto**. São Paulo; ABNT, 2009.
- \_\_\_. NBR 7215 – **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. São Paulo; ABNT, 1997.
- \_\_\_. NBR 7809 – **Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio**. São Paulo; ABNT, 2008.

\_\_\_ . NBR 8522: **Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_ . NBR ISO 14001 - **Sistemas de Gestão Ambiental – Especificações e Diretrizes para Uso.** Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_ . NBR ISO 14044 - **Gestão ambiental – Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_ . NBR NM 23 - **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** São Paulo; ABNT, 2001.

\_\_\_ . NBR NM 43 – **Cimento Portland– Determinação da pasta de consistência normal.** São Paulo; ABNT, 2003.

\_\_\_ . NBR NM 45 – **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** São Paulo; ABNT, 2006.

\_\_\_ . NBR NM 52 – **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** São Paulo; ABNT, 2009.

\_\_\_ . NBR NM 53 – **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção.** São Paulo; ABNT, 2009.

\_\_\_ . NBR NM 65 – **Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.** São Paulo; ABNT, 2003.

\_\_\_ . NBR NM 248 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** São Paulo; ABNT, 2003.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil.** Série Sustentabilidade, volume 5. São Paulo: Blücher, 2011.

ALTHEMAN, D. **Avaliação da Durabilidade de Concretos Confeccionados com Entulho de Construção Civil.** Campinas, 2002. 102 f. Relatório (Iniciação Científica) – Universidade de Campinas.

ALTOQI. Site da empresa. Disponível em: <<http://www.altoqi.com.br>>. Acesso em: 14 de maio de 2016.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** Tradução e adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. Editora PINI, 1<sup>a</sup> Edição, 1992.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola

Politécnica – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2000.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento**. De concretos. 167p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

ARAÚJO, R, C, C. **Avaliação experimental de concretos sustentáveis utilizando resíduo de construção e demolição como agregado graúdo, resíduo de mármore como agregado miúdo e com adição de fibra sintética**. (2015).

ARENA, U., MASTELLONE, M.L., PERUGINI, F., 2003. **Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system**. Int. J. Life Cycle Assess. 8 (2), 92e98.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618-05: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. Philadelphia, EUA, 2012.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash - **Construction and Building Materials**, v. 17, n. 3, p. 147-152, abril, 2003.

AUTODESK. **Software para estudantes e professores**. 2015. Disponível em: <<http://www.autodesk.com.br>>. Acesso em: 01 de julho de 2016.

BANTHIA, N.; CHAN, C. **Use of recycled aggregate in plain and fiber reinforced shotcrete**. Concrete Internacional, v.22, n.6. June 2000. p. 41-45.

BARDAR, M. S.; KUPWADE-PATIL, K.; BARNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; ALLOUCHE, E. N. **Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes** - Construction and Building Materials v. 61, p. 79-89, junho, 2014.

BARY, B.; SELIER, A. **Coupled Moisture-Carbon Dioxide-Calcium Transfer Model for Carbonation of Concrete**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 10, p. 1859-1872, 2004.

BASF REPORT 2014. **Economic, environmental and social performance**. Disponível em: <[https://www.basf.com/documents/corp/en/aboutus/publications/reports/2015/BASF\\_Report\\_2014.pdf](https://www.basf.com/documents/corp/en/aboutus/publications/reports/2015/BASF_Report_2014.pdf)>. Acesso em: 12 de janeiro de 2017.

BLENGINI, G.A., 2009. **Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy**. Build. Environ. 44, 319e330.

BLENGINI, G.A., GARBARINO, E., 2010. **Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix**. J. Clean. Prod. 18, 1021e1030.

BRASIL. **Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil**, 2015. Disponível em: < [www.caixa.gov.br/sinapi](http://www.caixa.gov.br/sinapi) >. Acesso em: 15 julho de 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério da Ciência e Tecnologia, **Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> pela energia elétrica do Interligado Nacional do Brasil**, 2010. Disponível em: <[www.mct.gov.br/clima](http://www.mct.gov.br/clima)>. Acesso em: 15 de julho de 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. **Consumo sustentável – Manual de Educação. MEC**, 2005. 162p. Disponível em: <[portal.mec.gov.br/dmdocuments/publicacao8.pdf](http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/publicacao8.pdf)>. Acesso em: 11 de julho de 2016.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos - Doutor em ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, 2007.

CABRAL, A. E. B. et al. **Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 4, p. 421-430, abr. 2010.

CABRAL, A. E.; KELVYA, M. V. M.. **Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Fortaleza, Agosto de (2011).

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF). **Manejo e gestão de resíduos da construção civil: Volume 1 – Manual de Orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios/ coordenadores: Tarcísio Paula Pinto, Juan Luís Rodrigo Gonzáles**. Brasília, 194 p., 2005.

CALADO, C., CAMÕES, A., MONTEIRO, E., HELENE, P., & BARKOKÉBAS, B. (2015). **Indicadores de durabilidade de concreto auto-adensável em ambiente quente e agressivo. Comparativo com concreto convencional**. In BAC2015, IV Congresso Ibero americano sobre Betão Autocompactável (pp. 309-318).

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: na introduction**. New Yor: John Wiley & Sons, 2000. 871p.

CARNEIRO, A. P. et al. **Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, 2000, Salvador. Anais... Salvador: UFBA, 2000. 1 CD.

CARRIJO, P. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

CASCUDO, O. **Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de corrosão da armadura**. In: ISAÍÁ, G.C. (ed.), *Concreto: Ensino, pesquisa e realizações* – São Paulo: IBRACON, 2005.

CASCUDO, O; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto** – *Concreto: Ciência e Tecnologia*. – São Paulo: IBRACON, 2011. V1. pp. 849-883.

CASTELLOTE, M; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations**. Mater. Struct., 42 (2009), pp. 515–525.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2003.

CEMBUREAU. THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **The role of cement in the 2050 low carbon economy**. 2013. 64 p.

CESEC. **Flexão composta oblíqua**. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/>>. Acesso em 22 de fevereiro de 2014.

CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos**. Rio de Janeiro, Qualitymark Editora, 2002.

CIB; UNEP-IETC. THE INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY CENTRE. **Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries: A discussion document**. South Africa: CSIR Building and Construction Technology, 2002. 91 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABATECIMENTO (CONAB). Disponível em:<<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&>>. Acesso em: 22 de agosto de 2016.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CNUMAD). **Agenda 21**. Brasília : Senado Federal, 1996.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL; PROGRAMA NACIONAL DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas: Subsídios para a promoção da Construção Civil Sustentável**. 2014. 111 p.

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n° 307/2002**. Disponível em:<[HTTP://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html)>. Acesso em 18 de junho de 2016.

\_\_. **RESOLUÇÃO CONAMA n° 431/2011**. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>>. Acesso em 16 de outubro de 2016.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO; R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete**. Materials and Structures, v. 42, p. 983-92, 2009.

CORREIA, J. R.; BRITO, J. de, PEREIRA, A. S. **Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates**. *Materials and Structures* (2006), doi:10.1617/s11527-005-9014-7.

CUENCA-MOYANO, G. M. et al. Development of the life cycle inventory of masonry mortar made of natural and recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1272-1286, 2017.

CURRAN, M. A. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. Reston, Virginia: Scientific Applications International Corporation (SAIC), 2006. 88 p.

DHILLON, B. S. Life cycle cost: a survey. **Microelectron Reliab**, v. 21, n. 4, p. 495- 511, 1981.

DING, T., XIAO, J., TAM, V.W.Y., 2016. **A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China**. *Waste Manag.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.031>.

DNPM - DEPARTEAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário mineral 2015**. Cimento. Brasília: DNPM. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em 24 de junho de 2016.

DUAN, H., WANG, J., HUANG, Q., 2015. **Encouraging the environmentally sound management of C&D waste in China: an integrative review and research agenda**. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43, 611e620.

DING, G.K.C., 2014. **Life Cycle Assessment (LCA) of Sustainable Building Materials: an Overview**, pp. 38e62. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857097729.1.38>. *Eco-Efficient Construction and Building Materials. Life Cycle Assessment (LCA), Eco- Labelling and Case Studies*.

ECO-INDICATOR 99 MANUALS, 2017. Disponível em < <https://www.pre-sustainability.com/news/eco-indicator-99-manuals>>. Acesso em 19 de dezembro de 2017.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete**. *Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 735 – 742, 2007.

FIB. Fédération internationale du béton. **Guidelines for green concrete structures**. Task Group 3.8, Denmark, 2012..

FIGUEIREDO, E. J. P. **Fatores Determinantes da Iniciação e Propagação da Corrosão da Armadura do Concreto**. São Paulo EPUSP-BT/PCC/121. 1993.

FONSECA, Adriana Pinheiro. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. Uberlândia: UFU, 2006. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Departamento de engenharia de estruturas.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2001.

GAYARRE, F.L., P\_EREZ, J.G., P\_EREZ, C.L.C., ET AL., 2016. **Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates.** J. Clean. Prod. 11, 41e53.

GOEDKOOP et al.. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level.** First edition. Report I: Characterisation. Ruimte em Milieu Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening em Milieubeheer. Jan. 2009.

GÓMEZ-SOBERON, J. M. V. **Porosity of concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study.** Cement and concrete research, v. 32, 2002, p. 1301-1311.

GONÇALVES, J, P ; SILVA, F, G, S; COSTA, D, B. **Sustentabilidade na construção civil: Avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> em edificações e mitigação.** REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado de Educação Ambiental. 2013.

GUINÉE, J. B. **Handbook on Life Cycle Assessment: operational guide to the ISO standards.** Kluwer Academic Publishers. Holanda, 2002.

GUOGUO, L. **Integration of LCA and LCC for decision making in sustainable building industry.** Chalmers University of Technology, 2009. 35 p.

GURSEL, P., MASANET, E., HORVATH, A., STADEL, A., 2014. **Life-cycle inventory analysis of concrete production: a critical review.** Cem. Concr. Comp. 51, 38e48.

HA, J.; KWAK, D. K.; LEE, T. S. **Integrated economical-environmental decision-making on wastewater treatment plant construction project.** In: US-Korea Conference on Science, Technology and Entrepreneurship, Teaneck, NJ. 2006. Proceedings. Vienna (VA): Korean- American Scientist and Engineers Association, 2006. (Paper, CET-3.6).

HEEDE, V. P.; BELIE, N. **Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes:** Literature review and theoretical calculations. Cement and Concrete Composites. Issue 4, v. 34, p. 431-442, 2012.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo, 1992.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 231p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L.; VIEIRA, J.O.; ANDRADE, T.; DELGADO, C.; JUST, A. **Influência da relação água / cimento e abatimento na carbonatação do concreto.** Publicação IBRACON 1999.

HELENE, P. **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

HYVERT, N. **Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton**, PhD Thesis, Université de Toulouse, 2009.

HOLTHAUSEN, C. **Desenvolvimento sustentável.** Florianópolis, 2002.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H.; **Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation** – Cement and Concrete Research – v.32, n.12, p. 1923-1930, 2002.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores conjunturais: produção agrícola.** Brasília: IBGE 2017.

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

INGRAO, C., LO GIUDICE, A., MBOHWA, C., CLASADONTE, M.T., 2014. **Life Cycle Inventory analysis of a precast reinforced concrete shed for goods storage.** J. Clean. Prod.79, 152e167

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: Mitigation of Climate Change.** IPCC, 2007a. Disponível em:<[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg3\\_report\\_mitigation\\_of\\_climate\\_change.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg3_report_mitigation_of_climate_change.htm)>. Acesso em: 28 de maio de 2016.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: Mitigation of Climate Change.** IPCC, 2014. Disponível em:<[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)>. Acesso em 21 de junho de 2016.

ISAIA, G.C. **Efeito de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: Um Estudo com Vistas à Corrosão da Armadura.** 1995. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C., (2001). **Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto? Reflexões sobre o tema.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15686-5:** Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: **Life-cycle costing.** Genève, 2008.

\_\_\_. ISO 21929-1: **Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings.** Genebra, Suíça, 2011.

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

JOHN, V. M. ET ALL, (2001). **Durabilidade e sustentabilidade: desafios para a construção civil brasileira.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

JOHN, V.M., **Trabalho apresentado no Seminário de Construção Sustentável da FGV.** São Paulo, 21 de junho de 2005. Disponível em:<[http://www.ces.fgvsp.br/arquivos/Moacyr\\_John.pdf](http://www.ces.fgvsp.br/arquivos/Moacyr_John.pdf)>. Acesso em: 16 de abril de 2016.

JOHN, V. M. Desafios da construção sustentável. In: **Boas práticas para habitação mais sustentável.** JOHN, V. M.; PRADO, R. T. A. (Coord.). São Paulo, 2010.

JOHN, V. M.; PACCA, S. A.; ANGULO, S. C. **Avaliação do ciclo de vida modular para construção sustentável.** São Paulo: Associação Brasileira do Cimento Portland, 2014.

KATZ, Amnon. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete.** *Cement and concrete research*, v. 33, n. 5, p. 703-711,2003.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. **Determinação da eficiência de películas usadas como proteção contra carbonatação.** Boletim Técnico – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 20p., 1995.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** 199p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis .**2010, 362p.

KOU, S.C.; POON, C.S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement & Concrete Composites**, article in press, 2013.

LAMBERTI, L. A. **Análise do ciclo de vida e de custo de pilar com diferentes traços de concreto frente a carbonatação:** do berço ao túmulo. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

Langdon D. 2007b. Life Cycle Costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: Guidance on the use of the LCC Methodology and its application in public procurement, Davis Langdon – **Management Consulting**, 2007

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

LEME, M.M.V., ROCHA, M.H., LORA, E.E.S., VENTURINI, O.J., LOPES, B.M., FERREIRA, C.H., 2014. **Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil**. Resour. Conserv. Recy. 87, 8e20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>.

LEVY, S. M. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, Produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria**. São Paulo. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LI, J; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1287–1291, 2009.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LÜTZKENDORF, T.; LORENZ, D. **The possible use of LCC & LCA for commercial property valuations: putting a value on ‘green’ building**. In: World Building Congress, 2004, Toronto. Disponível

em:<[http://www.lorenzimmobilien.net/documents/Putting\\_a\\_Value\\_on\\_Green\\_Buildings.pdf](http://www.lorenzimmobilien.net/documents/Putting_a_Value_on_Green_Buildings.pdf)>. Acesso em: 17 de junho de 2016.

MAEKAWA, K.; ISHIDA, T.; KISHI, T. Multi-scale modeling of Concrete performance– **Journal of Advanced Concrete Technology** – Japan concrete Institute Vol.1, n. 2, p.91-126, July 2003.

**Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil**. 2011. Disponível em:<<http://www.sinduscon-ce.org/ce/downloads/pqvc/Manual-de-Gestao-de-Residuos-Solidos.pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2016.

MARZOUK, M., AZAB, S., 2014. **Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics**. Resour. Conserv. Recycl. 82, 41e49.

MASCE, N. O.; MIYAZATO, S.; YODSUDJAI, W. **Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 15, N. 5, pg. 443-451, 2003.

MEARIG, T.; COFFEE, N.; MORGAN, M. **Life Cycle Cost Analysis Handbook**. 1. ed. Alaska: Department of Education & Early Development, 1999. 30 p

MEHTA, P.K. **Rice husk ash: a unique supplementary cementing material**. In: MALHOTRA, V.M. (Ed.). Advances in concrete technology. Ottawa: Canmet, p.403-431. 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2008). **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 3.ed.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo. Ed. Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MELO NETO, A. A. de; HELENE, P. R. do L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44º, Belo Horizonte, 2002. **Anais...** Belo Horizonte: IBRACON, 2002. CD-ROM.

MINISTRY OF HOUSING, SPATIAL PLANNING AND THE ENVIRONMENT. **Eco-Indicator 99 Manual for designers** – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. 2000. 49 p.

NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismo de transporte de fluidos no concreto**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pine, 1997.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

NUNES, F. L.; HELENE, P. R. L. **Influência da Dosagem na Carbonatação dos Concretos**. Dissertação (Mestrado) São Paulo: EPUSP. 1998. 213p.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. **Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes**. *Cement and Concrete Research*, v. 32, p.179 – 185, 2002.

OTSUKI, N.; MIYAZATO, S. **The influence of recycled aggregate on ITZ, permeability and strength of concrete**. *Proceedings of International Workshop on Recycled Concrete*, Tokyo, Japan, 2000. pp. 77–93.

PABLOS, J.M.; SICHIERI, E.P.; ZAGO, M.S.A. Study for Utilization of Industrial Solid Waste, Generated by the Discharge of Casting Sand Agglomeration with Clay and of Blast Furnace Slag, in Concrete Composition. **Key Engineering Materials (Online)**, v. 517, p. 611-616, 2012.

PARK, D. C. (2008). **Carbonation of concrete in relation to CO<sub>2</sub> permeability and degradation of coatings**. *Construction and building materials*, 22(11), 2260–2268. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.032>

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de previsão**. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFGRS e Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2009.

PAZ, D.H.F., LAFAYETTE, K.P.V., 2016. **Forecasting of construction and demolition waste in Brazil**. *Waste Manag. Res.* 34 (8), 708e716.

PIAIA, J.C.Z.; ROCHA, J.C.; CHERIAF, M.; MSTELIER, N.L. Measurements of water penetration and leakage in masonry wall: Experimental results and numerical simulation. **Building and Environment**, v. 61, p. 18-26, 2013.

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S.C. **Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete.** Cement and Concrete Research, volume 34, pages 31 – 36, 2004.

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

PORTAL ODM. **Acompanhamento municipal dos objetivos de desenvolvimento do milênio.** Disponível em: <[www.portalodm.com.br/FIEP](http://www.portalodm.com.br/FIEP)>. Acesso em: 15 de junho de 2016.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado.** 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 263 p.. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2010.

POSSAN, E., DEMOLINER, C. A. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral.** Revista Técnico Científica, 2013.

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

PRUDÊNCIO, J. R.; SANTOS, S. **Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz.** In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996. p. 46-52.

RAHAL, K. **Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate.** Building and Environmental, Vol 42, p 407-415, 2007.

REIS, F.J.L. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação.** (Dissertação de Mestrado).Belém-PA, 2013.

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

ROUGEAU, P. Les résultats d'essais croisés AFREM: "Essai de carbonatation accélérée". In: Comptes- Rendu des Journées Techniques - AFPC-AFREM DURABILITE DES BETONS, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. p. 87-103. Toulouse, 1997.

SAETTA, A. V.; VITALIANI, R. V. **Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation.** Cement and Concrete Research, v. 34, p. 571 – 579, 2004.

SAGOE-CRENTSIL, Kwesi K.; BROWN, Trevor; TAYLOR, Alan Harry. **Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate**. Cement and concrete research, v. 31, n. 5, p. 707-712, 2001.

SANI, D.; MORICONI, G.; FAVA, G. CORINALDESI, V. **Leaching and mechanical behavior of concrete manufactured with recycled aggregates**. Waste Management. Vol. 25, pg. 177-182, 2005.

SANJUÁN, M.A.; OLMO, C. DEL. **Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating**. Building and Environment, 36 (2001), pp. 949–953.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Civil–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SENTHAMARAI, R. M.; MANOHARAN, P. D. **Concrete with ceramic waste aggregate**. Cement and Concrete Composites; volume 27, pages 910 – 913, 2005.

SENTENA, JEFERSON ALCANTARA ALVES. **carbonatação em concretos produzidos com agregados reciclados de concreto**. Salão de Iniciação Científica;. Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2010., 2010.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. **Avaliação do ciclo de vida: ferramenta para tomada de decisão**. Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente – v.1, n.1, Art. 4, 2006.

SILVA, A. O. **Estudo comparativo do ciclo de vida e de custo de pilar com diferentes traços de concreto**. 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SILVA, R. B. D., ANGULO, S. C., PILEGGI, R. G., & SILVA, C. O. (2015). **Dry cost concretes produced with density-separated-crushed-CDW recycled aggregates**. Ambiente Construído, 15(4), 335-349.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Disponível em: <[www.snic.org.br/numeros\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp)>. Acesso em: 03 de julho de 2016.

SONNEMAN, G. **Environmental damage estimations in industrial process chains – Methodology development with case study on waste incineration and special focus on humanhealth**. Tese (doutorado) - Tarragona. 332p. Universitat Rovira i Virgili – Espanha. 2002.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach**. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.

TCPO. **Tabela de Composição de Preços para Orçamento**. 13 edição. São Paulo, Pini, 2008.

TENÓRIO, Jonathas Judá Lima. **Avaliação das propriedades do concreto com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição visando aplicações estruturais.** Maceió:UFAL, 2007. 138p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Alagoas.

THIERY, M.; VILLAIN, G.; DANGLA, P.; PLATRET, G. **Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics.** Cement and Concrete Research, v xx, p. xx – xx, 2007.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto.** 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Programa de pós de graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

TUUTI, K. **Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research,** Stockholm, 1982.

UNEP – SBCI. UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME – SUSTAINABLE BUILDINGS & CLIMATE INITIATIVE. **Buildings & Climate Change: Industry Call to Action.** 2009. p.

UNEP – SBCI. **Common Carbon Metric for Measuring Energy Use and Reporting Greenhouse Gas Emission from Building Operations.**2012. Disponível em: <<http://www.unep.org/sbci/pdfs/unepsbcicarbonmetric.pdf>>. Acesso em: 07 de outubro de 2016.

UNEP; SETAC. UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **Life cycle management: a business guide to sustainability.** Paris, 2007. 51 p.

*UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Guidelines for social life cycle assessment of products.* France, 2009.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Climate change** (site). USEPA, 2009. Disponível em: <<http://www.epa.gov/climatechange>>. Acesso em: 05 de maio de 2016.

VENQUIARUTTO, S. D.; ISAÍÁ, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Carbonatação do concreto estrutural com altos teores de adições minerais e diferentes finuras.** In: IX Encontro Nacional do Ambiente Construído, ENTAC, Foz do Iguaçu, Paraná, 2002.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, p. 47 – 63, 2004.

VITALE, P., ARENA, N., DI GREGORIO, F., ARENA, U., 2017. Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building. Waste Manag. 60, 311e321.

WCED. WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future.** Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, Oxford, UK. 1987.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

XIÃO, J.; LI, J.; ZHANG, C. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.** Cement and Concrete Research, 2005, v. 35. p. 1187-1194.

ZORDAN, S, E. **Entulho da indústria da construção civil.** São Paulo. 2000: PCC-EPUSP. Disponível em:<[www.reciclagem.pcc.usp.br](http://www.reciclagem.pcc.usp.br)>. Acesso em: 15 abril de 2016.

ZAFEIROPOULOU, T., RAKANTA, E., & BATIS, G. (2011). **Progress in Organic Coatings Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars.** Progress in Organic Coatings, 72(1-2), 175–180.

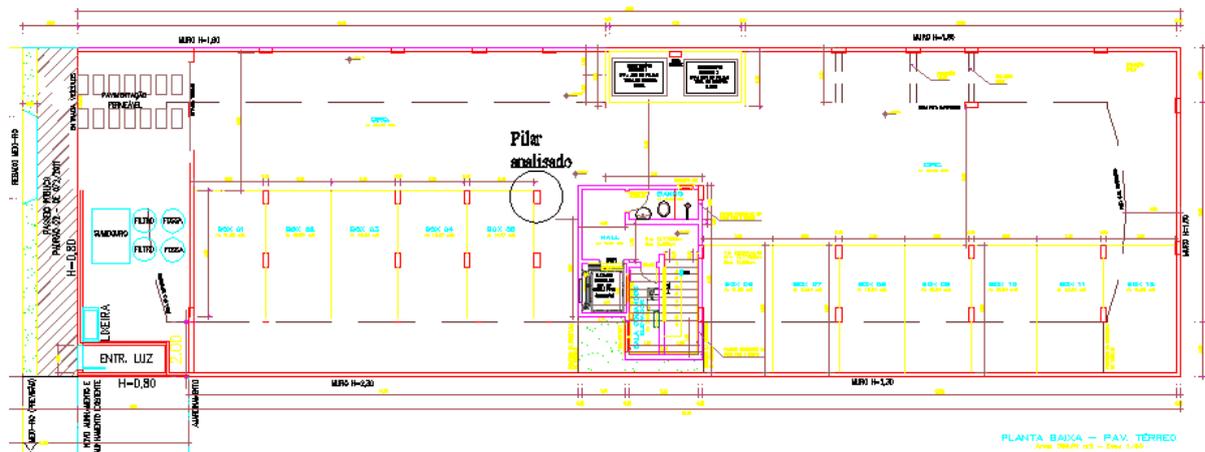


**APÊNDICE A**  
**DIMENSIONAMENTO DO PILAR**

## DIMENSIONAMENTO DO PILAR DE CONCRETO ARMADO

Para as condições de locação e cargas do pilar obteve-se os esforços solicitantes por meio do software Eberick V6. Foi escolhido através de um projeto fictício um pilar central da edificação, localizado no pavimento térreo sob pilotis, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Planta baixa com a posição do pilar estudado



**APÊNDICE B**

**TABELAS DE COMPOSIÇÃO DE PREÇOS**

Quadro 1 – Composição de materiais e custos do pilar Referência e cimento CP IV (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<b>PILAR - REF CP IV FCK 25MPa</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>1 pilar</b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>519,39</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
Cimento CP IV	122,67	kg	0,54	-	66,24	-
Areia média	242,88	kg	0,02	-	4,86	-
Brita 1	365,55	kg	0,02	-	7,31	-
Água para concreto	60,11	kg	0	-	0,25	-
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar Ø10	16,97	kg	3,54	2	60,07	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>230,21</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>11,51</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>241,72</b>	<b>277,67</b>

Quadro 2 – Composição de materiais e custos do pilar com 15% de RCD e cimento CP IV (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<b>PILAR - 15%RCD CP IV FCK</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>1 pilar</b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>524,04</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
Cimento CP IV	131,31	kg	0,54	-	70,91	-
Areia média	228,48	kg	0,02	-	4,57	-
Brita 1	305,95	kg	0,02	-	6,1	-
Água para concreto	59,10	kg	0	-	0,24	-
Aditivo hiperplastificante MasterGlenium54	0,13	kg	9,56		1,24	-
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar Ø10	16,97	kg	3,54	2	60,10	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>234,64</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>11,73</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>246,37</b>	<b>277,67</b>

Quadro 3 – Composição de materiais e custos do pilar com 30% de RCD e cimento CP IV (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<b>PILAR - 30%RCD CP IV FCK</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>1 pilar</b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>542,25</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
Cimento CP IV	166,31	kg	0,54	-	89,81	-
Areia média	187,93	kg	0,02	-	3,76	-
Brita 1	247,80	kg	0,02	-	4,96	-
Água para concreto	58,21	kg	0	-	0,24	-
Aditivo hiperplastificante MasterGlenium54	0,17	kg	9,56		1,63	-
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar Ø10	16,97	kg	3,54	2	60,10	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>251,98</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>12,60</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>264,58</b>	<b>277,67</b>

Quadro 4 – Composição de materiais e custos do pilar Referência e cimento CP V-ARI (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<b>PILAR - REF CPV-ARI FCK 25MPa</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>1 pilar</b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>514,67</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
Cimento CP V-ARI	95,26	kg	0,64	-	60,96	-
Areia média	275,29	kg	0,02	-	5,51	-
Brita 1	370,55	kg	0,02	-	7,41	-
Água para concreto	60,96	kg	0	-	0,25	-
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar $\Phi 10$	16,97	kg	3,54	2	60,10	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>225,71</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>11,29</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>237,00</b>	<b>277,67</b>

Quadro 5 – Composição de materiais e custos do pilar com 15% de RCD e cimento CP V-ARI (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<b>PILAR - 15%RCD CPV-ARI FCK 25MPa</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>1 pilar</b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>552,00</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
Cimento CP V-ARI	151,46	kg	0,64	-	96,93	-
Areia média	216,58	kg	0,02	-	4,33	-
Brita 1	313,52	kg	0,02	-	6,27	-
Água para concreto	60,58	kg	0	-	0,25	-
Aditivo hiperplastificante MasterGlenium54	0,20	kg	9,56		1,91	
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar Ø10	16,97	kg	3,54	2	60,10	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>261,27</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>13,06</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>274,33</b>	<b>277,67</b>

Quadro 6 – Composição de materiais e custos do pilar com 30% de RCD e cimento CP V-ARI (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<i>PILAR - 30%RCD CPV-ARI FCK</i>					<i>UNIDADE</i>	<i>1 pilar</i>
					<i>DATA</i>	<i>março/1</i>
<i>COMPONENTES</i>	<i>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</i>				<i>TOTAL</i>	<i>582,74</i>
<i>Discriminação</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Unidade</i>	<i>Preço unitário</i>		<i>Custo do Material</i>	<i>Custo da M.O</i>
			<i>Mat</i>	<i>M.O</i>		
Cimento CP V-ARI	200,03	kg	0,64	-	128,02	-
Areia média	164,03	kg	0,02	-	3,28	-
Brita 1	256,04	kg	0,02	-	5,12	-
Água para concreto	60,01	kg	0	-	0,25	-
Aditivo hiperplastificante MasterGlenium54	0,24	kg	9,56	-	2,29	-
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar $\Phi$ 10	16,97	kg	3,54	2	60,10	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b><i>TOTAIS SEM ENCARGOS</i></b>					<b>290,54</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>14,53</i>	
<b><i>TOTAIS COM ENCARGOS</i></b>					<b>305,07</b>	<b>277,67</b>

Quadro 7 – Composição de materiais e custos do pilar com 15% de RCD, 25%CCA e cimento CP V-ARI (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<b>PILAR - 15%RCD25%CCA CPV-ARI</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>1 pilar</b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>461,83</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
Cimento CP V-ARI	88,01	kg	0,64	-	56,33	-
Cinza de casca de arroz	22,00	kg	0,25		5,50	-
Areia média	266,67	kg	0,02	-	5,33	-
Brita 1	309,80	kg	0,02	-	6,20	-
Água para concreto	59,85	kg	0	-	0,25	-
Aditivo hiperplastificante MasterGlenium54	0,086	kg	9,56	-	0,82	-
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar $\Phi$ 10	16,97	kg	3,54	2	60,10	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>223,01</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>11,15</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>234,16</b>	<b>277,67</b>

Quadro 8 – Composição de materiais e custos do pilar com 30% de RCD, 25%CCA e cimento CP V-ARI (código 03310.8.1 - TCPO 13, página 152)

<b>PILAR - 30%RCD25%CCA CPV-ARI</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>1 pilar</b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>521,68</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
Cimento CP V-ARI	98,52	kg	0,64	-	63,05	-
Cinza de casca de arroz	24,63	kg	0,25		6,15	
Areia média	250,25	kg	0,02	-	5,01	-
Brita 1	251,23	kg	0,02	-	5,02	-
Água para concreto	59,11	kg	0	-	0,24	-
Aditivo hiperplastificante MasterGlenium54	0,14	kg	9,56	-	1,34	-
Estribos 5 mm	4,43	kg	3,68	-	16,30	-
Armadura para pilar Ø10	16,97	kg	3,54	2	60,10	33,94
Fôrma para pilares com madeira compensada resinada e=12	4,125	m <sup>2</sup>	18,03	9,04	74,37	37,29
Betoneira	0,306	h prod	2,64	-	0,81	-
Servente	6	h	-	9,39	-	56,34
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>232,39</b>	<b>127,57</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>150,10</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>11,62</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>244,01</b>	<b>277,67</b>

Quadro 9 – Composição de fôrma para pilares com madeira compensada 12mm (código 03110.8.2 - TCPO 13, página 127)

<b>FÔRMA PARA PILARES COM MADEIRA COMPENSADA 12 mm</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>35,23</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
<i>Ajudante de carpinteiro</i>	0,204	<i>h</i>	-	6,98	0,00	1,42
<i>carpinteiro</i>	0,82	<i>h</i>	-	9,29	0,00	7,62
<i>Chapa compensada 12mm</i>	0,25	<i>m<sup>2</sup></i>	27,63	-	6,91	0,00
<i>Prego 17x21 com cabeça (comprimento 48,3 mm / diâmetro da cabeça: 3.0 mm)</i>	0,04	<i>kg</i>	8,80	-	0,35	0,00
<i>Pontalete 3"x3" (altura: 75mm / largura: 75mm)</i>	1,20	<i>m</i>	2,81	-	3,37	0,00
<i>Sarrafo 1"x3" (altura: 75mm/ espessura 25 mm)</i>	1,65	<i>m</i>	0,65	-	1,07	0,00
<i>Tábua 1"x8" (espessura 25mm/ largura: 200mm)</i>	0,104	<i>m<sup>2</sup></i>	8,07		0,84	0,00
<i>Tábua 1"x6" (espessura 25mm/ largura: 150mm)</i>	0,1	<i>m<sup>2</sup></i>	5,62		0,56	0,00
<i>Desmoldante de fôrmas para concreto</i>	0,02	<i>l</i>	6,03		0,12	0,00
<i>Prego 17x27 com cabeça dupla (comprimento: 62,1 mm/ diâmetro da cabeça: 3mm)</i>	0,1	<i>kg</i>	10,96		1,10	0,00
<i>Prego 15x15 com cabeça (comprimento 34,5 mm/diâmetro da cabeça: 2,4 mm)</i>	0,05	<i>kg</i>	9,83		0,49	0,00
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>14,81</b>	<b>9,04</b>
<i>Leis sociais</i>	117,66	%				10,64
<i>Ferramentas</i>	5	%			0,74	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>15,55</b>	<b>19,68</b>

Quadro 10 – Composição de armadura para pilar  $\Phi 10$  – sem estribo (código 03210.8.1.11 - TCPO 13, página 150)

<i>ARMADURA PARA PILAR <math>\Phi 10</math> - sem estribo</i>					<i>UNIDADE</i>	<i>m<sup>2</sup></i>
					<i>DATA</i>	<i>março/1</i>
<i>COMPONENTES</i>	<i>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</i>				<i>TOTAL</i>	<i>9,83</i>
<i>Discriminação</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Unidade</i>	<i>Preço unitário</i>		<i>Custo do Material</i>	<i>Custo da M.O</i>
			<i>Mat</i>	<i>M.O</i>		
Ajudante de armador	0,093	h	-	9,23	0,00	0,86
Armador	0,093	h	-	12,3	0,00	1,14
Espaçador circular de plástico para pilares (cobrimento	7,3	Unidade	0,09	-	0,66	0,00
Arame recozido (diâmetro do fio: 1,25 mm/ bitola 18 BWG)	0,02	kg	8,82	-	0,18	0,00
Barra CA-50 bitola 10 mm	1,10	kg	3,98	-	4,38	0,00
<b><i>TOTAIS SEM ENCARGOS</i></b>					<b><i>5,22</i></b>	<b><i>2,00</i></b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>2,35</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>0,26</i>	
<b><i>TOTAIS COM ENCARGOS</i></b>					<b><i>5,48</i></b>	<b><i>4,35</i></b>

Quadro 11 – Composição da limpeza dos pilares (código 03910.8.8.1 - TCPO 13, página 169)

<b>LIMPEZA DO SUBSTRATO DO PILAR COM JATO DE ÁGUA</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>9,50</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
<i>servente</i>	0,11	h	-	9,39	0,00	1,03
<i>água</i>	6	l	0,00413	-	0,025	0,00
<i>Solução limpadora diluída em água</i>	0,1	l	44,32	-	4,43	0,00
<i>Máquina lava-jato água quente/fria, pressão 1700 psi - locação</i>	2,50E-04	loc/un /h	1549,00	-	0,39	0,00
<i>Querosene</i>	0,13	l	15,87	-	2,06	0,00
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>6,91</b>	<b>1,03</b>
<i>Leis sociais</i>	117,66	%				1,21
<i>Ferramentas</i>	5	%			0,35	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>7,26</b>	<b>2,24</b>

Quadro 12 – Composição da pintura dos pilares (código 09115.8.5.1 - TCPO 13, página 291)

<i>PINTURA COM TINTA ACRILICA EM PISO DE CONCRETO, 2 DEMÃOS, APLICADO COM ROLO DE LÃ</i>					<i>UNIDADE</i>	<i>m<sup>2</sup></i>
					<i>DATA</i>	<i>março/17</i>
<i>COMPONENTES</i>		<i>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</i>			<i>TOTAL</i>	<i>41,90</i>
<i>Discriminação</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Unidade</i>	<i>Preço unitário</i>		<i>Custo do Material</i>	<i>Custo da M.O</i>
			<i>Mat</i>	<i>M.O.</i>		
<i>Ajudante de</i>	<i>0,3</i>	<i>h</i>	<i>-</i>	<i>9,25</i>	<i>0,00</i>	<i>2,78</i>
<i>Pintor</i>	<i>1,2</i>	<i>h</i>	<i>-</i>	<i>12,30</i>	<i>0,00</i>	<i>14,76</i>
<i>Tinta acrílica</i>	<i>0,30</i>	<i>l</i>	<i>11,79</i>	<i>-</i>	<i>3,54</i>	<i>0,00</i>
<b><i>TOTAIS SEM ENCARGOS</i></b>					<b><i>3,54</i></b>	<b><i>17,54</i></b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>20,64</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>0,18</i>	
<b><i>TOTAIS COM ENCARGOS</i></b>					<b><i>3,72</i></b>	<b><i>38,18</i></b>

Quadro 13 – Composição da demolição com martelo rompedor (código 02220.8.4.1 - TCPO 13, página 59)

<b>DEMOLIÇÃO DE CONCRETO ARMADO COM UTILIZAÇÃO DE MARTELO ROMPEDOR</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
					<b>DATA</b>	<b>março/1</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>146,98</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
<i>pedreiro</i>	<i>1,5</i>	<i>h</i>	<i>-</i>	<i>12,3</i>	<i>0,00</i>	<i>18,45</i>
<i>Ponteiro para rompedor (comprimento: 160mm/ diâmetro da seção: 32mm)</i>	<i>0,075</i>	<i>un.</i>	<i>144,38</i>	<i>-</i>	<i>10,83</i>	<i>0,00</i>
<i>Compressor de ar portátil rebocável, diesel, potência 63 HP (47 KW), capacidade 3,3m<sup>3</sup>/min (116 pcm) - vida útil 20</i>	<i>5,00</i>	<i>h prod</i>	<i>5,82</i>	<i>-</i>	<i>29,10</i>	<i>0,00</i>
<i>Martelo rompedor, pneumático, capacidade para furos com até 32mm de diâmetro - vida útil de 8000 h</i>	<i>15,00</i>	<i>h prod</i>	<i>4,12</i>	<i>-</i>	<i>61,8</i>	<i>0,00</i>
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>101,73</b>	<b>18,45</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>177,66</i>	<i>%</i>				<i>21,71</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>5,09</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>106,82</b>	<b>40,16</b>

Quadro 14 – Composição do carregamento do entulho no caminhão basculante (código 14510.8.1.1 - TCPO 13, página 368)

<b>CARGA MECANIZADA DE ENTULHO EM CAMINHÃO BASCULANTE</b>					<b>UNIDADE</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
					<b>DATA</b>	<b>março/17</b>
<b>COMPONENTES</b>	<b>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</b>				<b>TOTAL</b>	<b>3,29</b>
<b>Discriminação</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço unitário</b>		<b>Custo do Material</b>	<b>Custo da M.O</b>
			<b>Mat</b>	<b>M.O</b>		
<i>servente</i>	<i>0,0208</i>	<i>h</i>	<i>-</i>	<i>9,39</i>	<i>0,00</i>	<i>0,20</i>
<i>Carregadeira sobre rodas 129 HP, com caçamba para aplicação geral com bordas cortantes aparafusáveis, capacidade coroada de 2,10 m<sup>3</sup>, fator de carga média - vida útil: 8000 h</i>	<i>0,0104</i>	<i>h prod</i>	<i>164,25</i>	<i>-</i>	<i>1,71</i>	<i>0,00</i>
<i>Caminhão basculante, diesel, potência 228 HP (170 KW), capacidade de carga útil 15,46 t, caçamba 6 m<sup>3</sup> - vida útil: 8000 h</i>	<i>0,0104</i>	<i>h imp</i>	<i>96,19</i>	<i>-</i>	<i>1,00</i>	<i>0,00</i>
<b>TOTAIS SEM ENCARGOS</b>					<b>2,71</b>	<b>0,20</b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>0,24</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>0,14</i>	
<b>TOTAIS COM ENCARGOS</b>					<b>2,85</b>	<b>0,44</b>

Quadro 15 – Composição do transporte no caminhão basculante (código 22800.9.1. - TCPO 13, página 558)

<i>CAMINHÃO BASCULANTE, DIESEL, POTÊNCIA 228 HP (170 KW), CAPAC. DE CARGA ÚTIL: 15.46 t. CACAMBA: 6 M<sup>3</sup> - VIDA ÚTIL: 8000 h</i>					<i>UNIDADE</i>	<i>h</i>
					<i>DATA</i>	<i>março/17</i>
<i>COMPONENTES</i>		<i>COMPOSIÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO</i>			<i>TOTAL</i>	<i>229,58</i>
<i>Discriminação</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Unidad</i>	<i>Preço unitário</i>		<i>Custo do Material</i>	<i>Custo da M.O</i>
			<i>Mat</i>	<i>M.O.</i>		
<i>motorista de veículo comercial/ caminhão basculante</i>	<i>1</i>	<i>h</i>	<i>-</i>	<i>15,91</i>	<i>0,00</i>	<i>15,91</i>
<i>pneu 10 x 20 x 16 com câmara</i>	<i>0,004</i>	<i>Unidad</i>	<i>8590,00</i>	<i>-</i>	<i>34,36</i>	<i>0,00</i>
<i>graxa</i>	<i>0,009</i>	<i>kg</i>	<i>12,40</i>	<i>-</i>	<i>0,11</i>	<i>0,00</i>
<i>óleo diesel</i>	<i>36,50</i>	<i>l</i>	<i>2,95</i>	<i>-</i>	<i>107,68</i>	<i>0,00</i>
<i>depreciação de equipamentos de transportes</i>	<i>3,96E-05</i>		<i>226238,11</i>	<i>-</i>	<i>8,96</i>	<i>0,00</i>
<i>juros do capital de equipamentos de transportes</i>	<i>3,98E-05</i>		<i>226238,11</i>	<i>-</i>	<i>9,00</i>	<i>0,00</i>
<i>manutenção de equipamentos de transporte</i>	<i>1,13E-04</i>		<i>226238,11</i>	<i>-</i>	<i>25,56</i>	<i>0,00</i>
<b><i>TOTAIS SEM ENCARGOS</i></b>					<b><i>185,67</i></b>	<b><i>15,91</i></b>
<i>Leis sociais</i>	<i>117,66</i>	<i>%</i>				<i>18,72</i>
<i>Ferramentas</i>	<i>5</i>	<i>%</i>			<i>9,28</i>	
<b><i>TOTAIS COM ENCARGOS</i></b>					<b><i>194,95</i></b>	<b><i>34,63</i></b>

**APÊNDICE C**

**DADOS DE ENTRADA SOFTWARE SIMAPRO**

## MATERIAIS/ MONTAGENS DOS PILARES

PILAR REF CPIV		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPIV 32	122,67	kg
AREIA MÉDIA	242,88	kg
BRITA 1	365,55	kg
ÁGUA	60,11	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD CPIV		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPIV 32	131,31	kg
AREIA MÉDIA	228,48	kg
BRITA 1	305,95	kg
RCD	53,84	kg
ÁGUA	59,1	kg
ADITIVO	0,13	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD CPIV		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPIV 32	166,31	kg
AREIA MÉDIA	187,93	kg
BRITA 1	247,8	kg
RCD	106,44	kg
ÁGUA	58,21	kg
ADITIVO	0,17	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR REF CPV-ARI		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPV-ARI	95,26	kg
AREIA MÉDIA	275,29	kg
BRITA 1	370,55	kg
ÁGUA	60,96	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD CPV-ARI		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPV-ARI	151,46	kg
AREIA MÉDIA	216,58	kg
BRITA 1	313,52	kg
RCD	54,52	kg
ÁGUA	60,58	kg
ADITIVO	0,23	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD CPV-ARI		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPV-ARI	200,03	kg
AREIA MÉDIA	164,03	kg
BRITA 1	256,04	kg
RCD	110,02	kg
ÁGUA	60,01	kg
ADITIVO	0,24	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD25CCA CPV-ARI		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPV-ARI	88,01	kg
CCA	22	kg
AREIA MÉDIA	266,67	kg
BRITA 1	309,8	kg
RCD	54,57	kg
ÁGUA	59,85	kg
ADITIVO	0,1	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD25CCA CPV-ARI		
Materiais/Montagens	Quantidade	Unidade
CPV-ARI	98,52	kg
CCA	24,63	kg
AREIA MÉDIA	250,25	kg
BRITA 1	251,23	kg
RCD	107,39	kg
ÁGUA	59,11	kg
ADITIVO	0,16	kg
AÇO	21,4	kg
MADEIRA	0,0495	m <sup>3</sup>
Processos	Quantidade	Unidade
ENERGIA ELÉTRICA	0,5508	kWh

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

## MANUTENÇÃO DOS PILARES

PILAR REF CPIV		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	0	kg
QUEROSENE	0	l
ENERGIA ELÉTRICA	0	kWh
CO <sub>2</sub>	8,94	kg
TINTA	22,89	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD CPIV		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	0	kg
QUEROSENE	0	l
ENERGIA ELÉTRICA	0	kWh
CO <sub>2</sub>	9,57	kg
TINTA	30,94	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD CPIV		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	0	kg
QUEROSENE	0	l
ENERGIA ELÉTRICA	0	kWh
CO <sub>2</sub>	12,12	kg
TINTA	11,55	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR REF CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	0	kg
QUEROSENE	0	l
ENERGIA ELÉTRICA	0	kWh
CO <sub>2</sub>	10,2	kg
TINTA	27,22	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	412,5	kg
QUEROSENE	8,94	l
ENERGIA ELÉTRICA	13,41	kWh
CO <sub>2</sub>	16,21	kg
TINTA	0	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	412,5	kg
QUEROSENE	8,94	l
ENERGIA ELÉTRICA	13,41	kWh
CO <sub>2</sub>	21,41	kg
TINTA	0	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD25CCA CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	0	kg
QUEROSENE	0	l
ENERGIA ELÉTRICA	0	kWh
CO <sub>2</sub>	9,42	kg
TINTA	30,94	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD25CCA CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
ÁGUA P/ LAVAGEM	462	kg
QUEROSENE	10,01	l
ENERGIA ELÉTRICA	15,02	kWh
CO <sub>2</sub>	10,55	kg
TINTA	0	kg

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

## DESCARTE FINAL

PILAR REF CPIV		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD CPIV		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD CPIV		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR REF CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 15%RCD25CCA CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro

PILAR 30%RCD25CCA CPV-ARI		
Processos	Quantidade	Unidade
Óleo Diesel	12,85	1

Fonte: Adaptado dos dados de entrada do SimaPro



**APÊNDICE D**  
**INVENTÁRIO DAS EMISSÕES**

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
1	1-butanol	Ar	kg	2,877E-11	2,877E-11	2,877E-11	2,877E-11	2,878E-11	2,878E-11	2,877E-11	2,877E-11
2	1-butanol	Água	kg	1,014E-07	1,017E-07	1,015E-07	1,015E-07	1,022E-07	1,02E-07	1,016E-07	1,013E-07
3	1-pentanol	Ar	kg	2,574E-11	2,574E-11	2,574E-11	2,574E-11	2,574E-11	2,574E-11	2,574E-11	2,574E-11
4	1-pentanol	Água	kg	6,177E-11	6,178E-11	6,177E-11	6,177E-11	6,178E-11	6,178E-11	6,177E-11	6,177E-11
5	1-Pentene	Ar	kg	1,945E-11	1,945E-11	1,945E-11	1,945E-11	1,945E-11	1,945E-11	1,945E-11	1,945E-11
6	1-Pentene	Água	kg	4,668E-11	4,668E-11	4,668E-11	4,668E-11	4,669E-11	4,668E-11	4,668E-11	4,668E-11
7	1-Propanol	Ar	kg	1,968E-09	1,969E-09	1,969E-09	1,968E-09	1,97E-09	1,97E-09	1,969E-09	1,969E-09
8	1-Propanol	Água	kg	3,676E-10	3,676E-10	3,676E-10	3,676E-10	3,676E-10	3,676E-10	3,676E-10	3,676E-10
9	1,4-butanodiol	Ar	kg	4,045E-10	4,055E-10	4,047E-10	4,047E-10	4,07E-10	4,063E-10	4,05E-10	4,042E-10
10	1,4-butanodiol	Água	kg	1,618E-10	1,622E-10	1,619E-10	1,619E-10	1,628E-10	1,625E-10	1,62E-10	1,617E-10
11	2-Aminopropanol	Ar	kg	2,328E-11	2,328E-11	2,328E-11	2,328E-11	2,328E-11	2,328E-11	2,328E-11	2,328E-11
12	2-Aminopropanol	Água	kg	5,858E-11	5,858E-11	5,858E-11	5,858E-11	5,858E-11	5,858E-11	5,858E-11	5,858E-11
13	2-buteno, 2-metil-	Ar	kg	4,314E-15	4,314E-15	4,314E-15	4,314E-15	4,315E-15	4,315E-15	4,314E-15	4,314E-15
14	2-Cloroacetofenona	Ar	kg	1,798E-08	1,798E-08	1,798E-08	1,798E-08	1,798E-08	1,798E-08	1,798E-08	1,798E-08
15	2-Hexanona	Água	kg	1,428E-08	1,428E-08	1,428E-08	1,428E-08	1,428E-08	1,428E-08	1,428E-08	1,428E-08
16	2-Metil-1-propanol	Ar	kg	6,806E-11	6,807E-11	6,806E-11	6,806E-11	6,807E-11	6,807E-11	6,806E-11	6,806E-11
17	2-Metil-1-propanol	Água	kg	1,633E-10	1,634E-10	1,633E-10	1,633E-10	1,634E-10	1,634E-10	1,633E-10	1,633E-10
18	2-Metil-2-buteno	Água	kg	1,035E-14	1,035E-14	1,035E-14	1,035E-14	1,036E-14	1,036E-14	1,035E-14	1,035E-14
19	Ácido 2-nitrobenzóico	Ar	kg	4,191E-11	4,191E-11	4,191E-11	4,191E-11	4,191E-11	4,191E-11	4,191E-11	4,191E-11
20	2-propanol	Ar	kg	6,01E-06	6,028E-06	6,014E-06	6,013E-06	6,057E-06	6,043E-06	6,019E-06	6,005E-06
21	2-propanol	Água	kg	1,718E-10	1,718E-10	1,718E-10	1,718E-10	1,718E-10	1,718E-10	1,718E-10	1,718E-10
22	2,4-D	Solo	kg	3,061E-09	3,061E-09	3,059E-09	3,061E-09	3,064E-09	3,061E-09	3,06E-09	3,058E-09
23	4-Metil-2-pentanona	Água	kg	9,197E-09	9,197E-09	9,197E-09	9,197E-09	9,197E-09	9,197E-09	9,197E-09	9,197E-09
24	5-metil-Chrysene	Ar	kg	5,912E-11	5,912E-11	5,912E-11	5,912E-11	5,912E-11	5,912E-11	5,912E-11	5,912E-11
25	Acenafteno	Ar	kg	1,416E-09	1,416E-09	1,416E-09	1,416E-09	1,416E-09	1,416E-09	1,416E-09	1,416E-09
26	Acenafteno	Água	kg	2,037E-09	2,039E-09	2,038E-09	2,037E-09	2,042E-09	2,041E-09	2,038E-09	2,037E-09
27	Acenaftileno	Ar	kg	6,718E-10	6,718E-10	6,718E-10	6,718E-10	6,718E-10	6,718E-10	6,718E-10	6,718E-10
28	Acenaftileno	Água	kg	1,274E-10	1,275E-10	1,274E-10	1,274E-10	1,277E-10	1,276E-10	1,275E-10	1,274E-10
29	Acetaldeído	Ar	kg	5,452E-05	5,45E-05	5,446E-05	5,453E-05	5,451E-05	5,447E-05	5,45E-05	5,446E-05
30	Acetaldeído	Água	kg	2,041E-07	2,046E-07	2,042E-07	2,041E-07	2,055E-07	2,051E-07	2,043E-07	2,039E-07



Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
59	Cloreto de amônio	Ar	kg	3,407E-07	3,407E-07	3,407E-07	3,407E-07	3,407E-07	3,407E-07	3,407E-07	3,407E-07
60	Amônio, íon	Água	kg	0,0021622	0,0021483	0,0021343	0,0021634	0,0021506	0,0021367	0,0021491	0,0021349
61	Anidrite, no chão	Matéria prima	kg	4,678E-07	6,651E-07	7,256E-07	4,678E-07	7,715E-07	8,32E-07	6,195E-07	6,801E-07
62	Anilina	Ar	kg	1,918E-10	1,918E-10	1,918E-10	1,918E-10	1,918E-10	1,918E-10	1,918E-10	1,918E-10
63	Anilina	Água	kg	4,772E-10	4,772E-10	4,772E-10	4,772E-10	4,772E-10	4,772E-10	4,772E-10	4,772E-10
64	Antraceno	Ar	kg	5,643E-10	5,643E-10	5,643E-10	5,643E-10	5,643E-10	5,643E-10	5,643E-10	5,643E-10
65	Ácido antranílico	Ar	kg	3,054E-11	3,054E-11	3,054E-11	3,054E-11	3,054E-11	3,054E-11	3,054E-11	3,054E-11
66	Antimônio	Ar	kg	9,365E-07	9,383E-07	9,372E-07	9,367E-07	9,41E-07	9,399E-07	9,375E-07	9,363E-07
67	Antimônio	Água	kg	4,531E-05	4,553E-05	4,554E-05	4,532E-05	4,572E-05	4,573E-05	4,547E-05	4,547E-05
68	Antimônio	Solo	kg	6,107E-11	6,119E-11	6,11E-11	6,108E-11	6,14E-11	6,131E-11	6,113E-11	6,103E-11
69	Antimônio-122	Água	Bq	0,0006981	0,0006984	0,0006984	0,0006982	0,0006988	0,0006988	0,0006984	0,0006984
70	Antimônio-124	Ar	Bq	1,732E-06	1,732E-06	1,732E-06	1,732E-06	1,733E-06	1,733E-06	1,732E-06	1,732E-06
71	Antimônio-124	Água	Bq	0,1497215	0,1499413	0,1499763	0,1497292	0,1500989	0,1501359	0,1498855	0,149921
72	Antimônio-125	Ar	Bq	1,807E-05	1,808E-05	1,808E-05	1,807E-05	1,809E-05	1,809E-05	1,808E-05	1,808E-05
73	Antimônio-125	Água	Bq	0,1380194	0,1382196	0,1382507	0,1380267	0,1383642	0,1383972	0,1381687	0,1382002
74	AOX, halogênio orgânico adsorvível como Cl	Água	kg	2,115E-06	2,116E-06	2,116E-06	2,115E-06	2,117E-06	2,117E-06	2,115E-06	2,115E-06
75	Argon-41	Ar	Bq	60,374016	60,482615	60,502796	60,375947	60,554777	60,575287	60,45449	60,474585
76	Arsênio	Ar	kg	1,308E-05	1,31E-05	1,308E-05	1,309E-05	1,312E-05	1,311E-05	1,309E-05	1,308E-05
77	Arsênio	Solo	kg	7,537E-07	7,538E-07	7,537E-07	7,537E-07	7,539E-07	7,538E-07	7,537E-07	7,537E-07
78	Arsênio, íon	Água	kg	0,0002552	0,0002554	0,0002554	0,0002552	0,0002557	0,0002556	0,0002554	0,0002553
79	Arsine	Ar	kg	1,813E-13	1,818E-13	1,814E-13	1,813E-13	1,827E-13	1,822E-13	1,815E-13	1,811E-13
80	Atrazina	Solo	kg	1,049E-10	1,052E-10	1,05E-10	1,05E-10	1,057E-10	1,055E-10	1,051E-10	1,048E-10
81	Barite	Água	kg	0,0022936	0,0022929	0,0022898	0,002294	0,0022955	0,0022924	0,0022924	0,0022892
82	Barite, 15% em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	0,0342282	0,0342768	0,0342534	0,0342331	0,0343411	0,0343184	0,0342561	0,0342323
83	Bário	Ar	kg	9,42E-06	9,427E-06	9,428E-06	9,42E-06	9,432E-06	9,433E-06	9,425E-06	9,426E-06
84	Bário	Água	kg	0,0044331	0,0044347	0,0044347	0,0044332	0,0044361	0,0044361	0,0044342	0,0044342
85	Bário	Solo	kg	9,362E-05	9,368E-05	9,359E-05	9,364E-05	9,381E-05	9,373E-05	9,364E-05	9,355E-05
86	Bário-140	Ar	Bq	0,0011755	0,001176	0,001176	0,0011756	0,0011767	0,0011767	0,0011759	0,0011759
87	Bário-140	Água	Bq	0,0030581	0,0030595	0,0030594	0,0030585	0,0030613	0,0030613	0,0030593	0,0030592



Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
118	Borato	Água	kg	7,046E-09	7,046E-09	7,046E-09	7,046E-09	7,046E-09	7,046E-09	7,046E-09	7,046E-09
119	Borax, no chão	Matéria prima	kg	4,74E-07	4,745E-07	4,742E-07	4,741E-07	4,752E-07	4,75E-07	4,743E-07	4,74E-07
120	Boro	Ar	kg	0,0001709	0,0001712	0,0001712	0,0001709	0,0001714	0,0001714	0,0001711	0,0001712
121	Boro	Água	kg	0,0015551	0,0015581	0,0015562	0,0015554	0,0015627	0,0015608	0,0015567	0,0015547
122	Boro	Solo	kg	3,4E-06	3,403E-06	3,402E-06	3,4E-06	3,407E-06	3,406E-06	3,402E-06	3,4E-06
123	Trifluoreto de boro	Ar	kg	2,481E-15	2,488E-15	2,482E-15	2,482E-15	2,5E-15	2,494E-15	2,484E-15	2,478E-15
124	Bromato	Água	kg	1,479E-05	1,674E-05	1,734E-05	1,479E-05	1,779E-05	1,839E-05	1,629E-05	1,689E-05
125	Brometo	Água	kg	0,0004689	0,0004689	0,0004689	0,0004689	0,0004689	0,0004689	0,0004689	0,0004689
126	Bromo	Ar	kg	4,274E-05	4,278E-05	4,278E-05	4,274E-05	4,28E-05	4,28E-05	4,277E-05	4,277E-05
127	Bromo	Água	kg	0,0002697	0,0002701	0,00027	0,0002697	0,0002706	0,0002705	0,0002699	0,0002698
128	Bromina, 0,0023% em água	Matéria prima	kg	4,888E-07	4,888E-07	4,888E-07	4,888E-07	4,888E-07	4,888E-07	4,888E-07	4,888E-07
129	Bromoform	Ar	kg	1,002E-07	1,002E-07	1,002E-07	1,002E-07	1,002E-07	1,002E-07	1,002E-07	1,002E-07
130	BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno), razão não especificada	Ar	kg	2,034E-05	2,034E-05	2,034E-05	2,034E-05	2,034E-05	2,034E-05	2,034E-05	2,034E-05
131	Butadieno	Ar	kg	7,444E-09	7,445E-09	7,444E-09	7,444E-09	7,446E-09	7,445E-09	7,445E-09	7,444E-09
132	Butano	Ar	kg	0,0005804	0,0005807	0,0005801	0,0005805	0,0005816	0,000581	0,0005805	0,0005799
133	Butene	Ar	kg	7,252E-06	7,26E-06	7,256E-06	7,253E-06	7,272E-06	7,268E-06	7,257E-06	7,252E-06
134	Butene	Água	kg	7,121E-08	7,301E-08	7,335E-08	7,124E-08	7,419E-08	7,453E-08	7,254E-08	7,288E-08
135	Acetato de butilo	Água	kg	1,317E-07	1,321E-07	1,318E-07	1,318E-07	1,328E-07	1,325E-07	1,319E-07	1,316E-07
136	Butyrolactone	Ar	kg	9,323E-11	9,35E-11	9,329E-11	9,327E-11	9,395E-11	9,374E-11	9,337E-11	9,315E-11
137	Butyrolactone	Água	kg	2,238E-10	2,244E-10	2,239E-10	2,239E-10	2,255E-10	2,25E-10	2,241E-10	2,236E-10
138	Cádmio	Ar	kg	7,444E-06	7,44E-06	7,429E-06	7,445E-06	7,447E-06	7,437E-06	7,438E-06	7,427E-06
139	Cádmio	Solo	kg	1,461E-06	1,461E-06	1,461E-06	1,461E-06	1,461E-06	1,461E-06	1,461E-06	1,461E-06
140	Cádmio, 0,30% em sulfureto, Cd 0,18%, Pb, Zn, Ag, In, no solo	Matéria prima	kg	7,237E-06	7,241E-06	7,239E-06	7,238E-06	7,245E-06	7,244E-06	7,239E-06	7,237E-06
141	Cádmio, íon	Água	kg	6,837E-05	6,845E-05	6,84E-05	6,838E-05	6,856E-05	6,851E-05	6,842E-05	6,837E-05
142	Calcita, no chão	Matéria prima	kg	34,045284	34,046814	34,046478	34,045432	34,048528	34,048225	34,0463	34,045965
143	Cálcio	Ar	kg	0,002516	0,0025162	0,0025162	0,0025161	0,0025163	0,0025163	0,0025162	0,0025162
144	Cálcio	Solo	kg	0,0294168	0,0294177	0,0294171	0,0294169	0,029419	0,0294185	0,0294173	0,0294167

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
146	Carbetamida	Solo	kg	6,583E-08	6,584E-08	6,583E-08	6,583E-08	6,584E-08	6,584E-08	6,583E-08	6,583E-08
147	Carbofurano	Solo	kg	1,061E-08	1,061E-08	1,06E-08	1,061E-08	1,062E-08	1,061E-08	1,061E-08	1,06E-08
148	Carbono	Solo	kg	0,0331429	0,0331439	0,0331435	0,033143	0,033145	0,0331447	0,0331435	0,0331432
149	Carbon-14	Ar	Bq	520,9331	521,76436	521,90552	520,95638	522,34271	522,48934	521,55158	521,69331
150	Preto de carbono	Ar	kg	0,0042275	0,0045252	0,0057314	0,0047128	0,0074931	0,009896	0,0043541	0,004874
151	Dióxido de carbono	Ar	kg	4,792281	4,8880021	5,3586498	4,5853906	5,4637617	6,2191755	4,4412769	4,5838773
152	Dióxido de carbono, biogênico	Ar	kg	42,741074	42,742735	42,742805	42,741147	42,744104	42,744188	42,742257	42,742326
153	Dióxido de carbono, fóssil	Ar	kg	198,56264	198,64268	198,63068	198,56736	198,72248	198,71115	198,6152	198,60284
154	Dióxido de carbono, no ar	Matéria prima	kg	100,43423	100,4355	100,4354	100,43432	100,43673	100,43664	100,43511	100,435
155	Dióxido de carbono, transformação de terras	Ar	kg	0,0014231	0,0014255	0,0014257	0,0014231	0,0014273	0,0014275	0,0014248	0,0014251
156	Dissulfeto de carbono	Ar	kg	0,0001394	0,0001396	0,0001394	0,0001395	0,00014	0,0001398	0,0001395	0,0001392
157	Dissulfeto de carbono	Água	kg	1,465E-09	1,465E-09	1,465E-09	1,465E-09	1,465E-09	1,465E-09	1,465E-09	1,465E-09
158	Monóxido de carbono	Ar	kg	1,246E-06	1,246E-06	1,246E-06	1,246E-06	1,246E-06	1,246E-06	1,246E-06	1,246E-06
159	Monóxido de carbono, biogênico	Ar	kg	0,0481993	0,048199	0,0481984	0,0482	0,0482006	0,0482002	0,0481995	0,0481989
160	Monóxido de carbono, fóssil	Ar	kg	40,878535	43,571063	54,490546	46,245215	71,994339	94,246878	42,918419	47,730415
161	Carbono, em matéria orgânica, no solo	Matéria prima	kg	1,34E-05	1,34E-05	1,339E-05	1,34E-05	1,341E-05	1,34E-05	1,34E-05	1,338E-05
162	Carbonato	Água	kg	2,278E-05	2,477E-05	2,536E-05	2,278E-05	2,587E-05	2,646E-05	2,43E-05	2,489E-05
163	Ácidos carboxílicos, não especificados	Água	kg	0,001413	0,0014145	0,0014135	0,0014131	0,0014167	0,0014158	0,0014138	0,0014128
164	Cerium-141	Ar	Bq	0,000285	0,0002851	0,0002851	0,000285	0,0002853	0,0002853	0,0002851	0,0002851
165	Cerium-141	Água	Bq	0,0012227	0,0012232	0,0012232	0,0012228	0,0012239	0,0012239	0,0012231	0,0012231
166	Cerium-144	Água	Bq	0,0003722	0,0003724	0,0003724	0,0003723	0,0003726	0,0003726	0,0003724	0,0003724
167	Césio	Água	kg	3,275E-07	3,278E-07	3,276E-07	3,275E-07	3,284E-07	3,281E-07	3,277E-07	3,274E-07
168	Cesium-134	Ar	Bq	1,365E-05	1,365E-05	1,365E-05	1,365E-05	1,366E-05	1,366E-05	1,365E-05	1,365E-05
169	Cesium-134	Água	Bq	0,1119583	0,1121468	0,1121791	0,1119629	0,1122765	0,1123097	0,1120981	0,1121303
170	Cesium-136	Água	Bq	0,000217	0,0002171	0,0002171	0,000217	0,0002172	0,0002172	0,0002171	0,0002171
171	Cesium-137	Ar	Bq	0,0002419	0,000242	0,000242	0,000242	0,0002422	0,0002422	0,000242	0,000242
172	Cesium-137	Água	Bq	94,376148	94,534274	94,561906	94,379972	94,642568	94,671026	94,493561	94,521208

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
174	Cloramina	Água	kg	1,263E-09	1,263E-09	1,263E-09	1,263E-09	1,263E-09	1,263E-09	1,263E-09	1,263E-09
175	Clorato	Água	kg	0,0001145	0,0001294	0,000134	0,0001145	0,0001374	0,000142	0,000126	0,0001305
176	Cloreto	Ar	kg	9,179E-12	9,179E-12	9,179E-12	9,179E-12	9,179E-12	9,179E-12	9,179E-12	9,179E-12
177	Cloreto	Água	kg	0,8689693	0,8694626	0,8694141	0,8689991	0,8699365	0,8698932	0,8693029	0,8692532
178	Cloreto	Solo	kg	0,0060044	0,0060066	0,006005	0,0060047	0,00601	0,0060084	0,0060055	0,0060039
179	Solventes clorados, não especificados	Água	kg	6,836E-08	7,294E-08	7,431E-08	6,837E-08	7,546E-08	7,682E-08	7,188E-08	7,324E-08
180	Cloro	Ar	kg	0,0001914	0,0001916	0,0001917	0,0001914	0,0001918	0,0001918	0,0001916	0,0001916
181	Cloro	Água	kg	7,969E-06	7,876E-06	7,789E-06	8,054E-06	8,028E-06	7,973E-06	7,949E-06	7,877E-06
182	Ácido cloroacético	Ar	kg	1,969E-08	1,969E-08	1,969E-08	1,969E-08	1,969E-08	1,969E-08	1,969E-08	1,969E-08
183	Ácido cloroacético	Água	kg	4,019E-06	4,02E-06	4,02E-06	4,019E-06	4,02E-06	4,02E-06	4,02E-06	4,019E-06
184	Cloreto de cloroacetilo	Água	kg	7,812E-11	7,812E-11	7,812E-11	7,812E-11	7,812E-11	7,812E-11	7,812E-11	7,812E-11
185	Clorofórmio	Ar	kg	1,744E-07	1,744E-07	1,744E-07	1,744E-07	1,745E-07	1,745E-07	1,744E-07	1,744E-07
186	Clorofórmio	Água	kg	2,123E-09	2,129E-09	2,124E-09	2,124E-09	2,139E-09	2,134E-09	2,126E-09	2,121E-09
187	Clorossilano, trimetil-	Ar	kg	5,007E-09	5,013E-09	5,009E-09	5,008E-09	5,023E-09	5,018E-09	5,01E-09	5,005E-09
188	Ácido clorossulfônico	Ar	kg	2,896E-10	2,896E-10	2,896E-10	2,896E-10	2,896E-10	2,896E-10	2,896E-10	2,896E-10
189	Ácido clorossulfônico	Água	kg	7,223E-10	7,223E-10	7,223E-10	7,223E-10	7,223E-10	7,223E-10	7,223E-10	7,223E-10
190	Chlorothalonil	Solo	kg	3,215E-07	3,215E-07	3,215E-07	3,215E-07	3,216E-07	3,215E-07	3,215E-07	3,215E-07
191	Cromo	Ar	kg	0,0002523	0,0002524	0,0002523	0,0002523	0,0002526	0,0002525	0,0002523	0,0002523
192	Cromo	Água	kg	4,606E-06	4,606E-06	4,606E-06	4,606E-06	4,606E-06	4,606E-06	4,606E-06	4,606E-06
193	Cromo	Solo	kg	2,083E-05	2,083E-05	2,083E-05	2,083E-05	2,083E-05	2,083E-05	2,083E-05	2,083E-05
194	Cromo-51	Ar	Bq	1,826E-05	1,827E-05	1,827E-05	1,826E-05	1,828E-05	1,828E-05	1,827E-05	1,827E-05
195	Cromo-51	Água	Bq	0,2806774	0,2808806	0,2808889	0,2807028	0,2810787	0,2810954	0,2808361	0,2808476
196	Cromo VI	Ar	kg	1,67E-06	1,673E-06	1,671E-06	1,671E-06	1,677E-06	1,675E-06	1,672E-06	1,67E-06
197	Cromo VI	Água	kg	0,0004981	0,0004986	0,0004986	0,0004981	0,000499	0,000499	0,0004984	0,0004984
198	Cromo VI	Solo	kg	8,623E-06	8,635E-06	8,636E-06	8,623E-06	8,643E-06	8,645E-06	8,632E-06	8,633E-06
199	Cromo, 25,5% em cromite, 11,6% em minério bruto, em solo	Matéria prima	kg	0,0143394	0,0143727	0,0143516	0,0143434	0,0144219	0,0144013	0,0143572	0,0143358
200	Cromo, íon	Água	kg	2,487E-06	2,589E-06	2,619E-06	2,487E-06	2,646E-06	2,676E-06	2,565E-06	2,595E-06
201	Chrysene	Ar	kg	2,687E-10	2,687E-10	2,687E-10	2,687E-10	2,687E-10	2,687E-10	2,687E-10	2,687E-10
202	Crisotila, no solo	Matéria prima	kg	2,801E-06	3,171E-06	3,284E-06	2,801E-06	3,37E-06	3,483E-06	3,085E-06	3,198E-06

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
204	Argila, bentonite, no solo	Matéria prima	kg	0,6925394	0,6925486	0,6925435	0,6925405	0,6925616	0,6925567	0,6925446	0,6925394
205	Argila, não especificada, no solo	Matéria prima	kg	1,0802067	1,0816474	1,0805043	1,0804244	1,0840378	1,0829288	1,080936	1,0797799
206	Carvão, 26,4 MJ por kg, no solo	Matéria prima	kg	6,2312188	6,2312188	6,2312188	6,2312188	6,2312188	6,2312188	6,2312188	6,2312188
207	Carvão, 29,3 MJ por kg, no solo	Matéria prima	kg	37,092508	37,092508	37,092508	37,092508	37,092508	37,092508	37,092508	37,092508
208	Carvão, betuminoso, 24,8 MJ por kg, no solo	Matéria prima	kg	6,342039	6,788727	8,598227	5,829912	9,269352	12,241836	5,386212	6,029424
209	Carvão, marrom, no solo	Matéria prima	kg	6,4424293	6,4542093	6,4563714	6,4426362	6,4620525	6,4642485	6,4511467	6,453298
210	Carvão, difícil, não especificado, no solo	Matéria prima	kg	51,886764	52,089541	52,877967	51,663925	53,174163	54,468404	51,47694	51,757982
211	Cobalto	Ar	kg	6,183E-06	6,169E-06	6,151E-06	6,184E-06	6,175E-06	6,158E-06	6,169E-06	6,151E-06
212	Cobalto	Água	kg	0,0009834	0,0009842	0,0009841	0,0009834	0,000985	0,0009849	0,0009839	0,0009838
213	Cobalto	Solo	kg	1,817E-06	1,817E-06	1,817E-06	1,817E-06	1,817E-06	1,817E-06	1,817E-06	1,817E-06
214	Cobalto-57	Água	Bq	0,0068888	0,0068919	0,0068917	0,0068895	0,0068959	0,0068959	0,0068914	0,0068912
215	Cobalt-58	Ar	Bq	2,543E-05	2,544E-05	2,544E-05	2,543E-05	2,545E-05	2,545E-05	2,544E-05	2,544E-05
216	Cobalt-58	Água	Bq	1,6227378	1,6243785	1,6245541	1,6228605	1,6257413	1,625955	1,6239871	1,6241756
217	Cobalt-60	Ar	Bq	0,0002246	0,0002247	0,0002247	0,0002247	0,0002249	0,0002249	0,0002247	0,0002247
218	Cobalt-60	Água	Bq	1,3403783	1,3416444	1,3417652	1,3404843	1,3427282	1,3428824	1,3413468	1,3414793
219	Cobalto, no solo	Matéria prima	kg	4,72E-08	4,722E-08	4,721E-08	4,72E-08	4,725E-08	4,724E-08	4,721E-08	4,72E-08
220	COD, Demanda química de oxigênio	Água	kg	0,1966607	0,1971085	0,1971542	0,1966724	0,1974417	0,197489	0,1969824	0,1970272
221	Colemanite, no chão	Matéria prima	kg	0,0001213	0,0001216	0,0001214	0,0001213	0,0001219	0,0001218	0,0001214	0,0001213
222	Cobre	Ar	kg	5,119E-05	5,123E-05	5,118E-05	5,12E-05	5,131E-05	5,126E-05	5,121E-05	5,116E-05
223	Cobre	Solo	kg	2,322E-05	2,323E-05	2,323E-05	2,322E-05	2,323E-05	2,324E-05	2,323E-05	2,323E-05
224	Cobre, 0,99% em sulfureto, Cu 0,36% e Mo 8.2E-3% em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	0,0013022	0,0013049	0,0013029	0,0013025	0,0013093	0,0013074	0,0013036	0,0013016
225	Cobre, 1,18% em sulfureto, Cu 0,39% e Mo 8.2E-3% em minério bruto, em solo	Matéria prima	kg	0,0071682	0,0071834	0,0071723	0,0071702	0,0072074	0,0071966	0,007176	0,0071648



Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
255	Energia, valor calorífico bruto, em biomassa, floresta primária	Matéria prima	MJ	0,0009289	0,000929	0,0009281	0,000929	0,0009298	0,000929	0,0009287	0,0009279
256	Energia, cinética (em vento), convertida	Matéria prima	MJ	2,6447062	2,6495189	2,6504103	2,6447898	2,6527153	2,6536204	2,6482697	2,6491568
257	Energia, potencial (em reservatório hidrelétrico), convertido	Matéria prima	MJ	22,381899	22,415524	22,418347	22,383308	22,441987	22,445121	22,406287	22,409124
258	Energia, energia solar, convertida	Matéria prima	MJ	0,0408113	0,0408801	0,0408924	0,0408128	0,0409268	0,0409395	0,0408624	0,0408747
259	Etano	Ar	kg	0,0020322	0,0020305	0,0020279	0,0020325	0,0020317	0,0020291	0,0020304	0,0020278
260	Etano, 1,1-difluoro-, HFC-152a	Ar	kg	1,497E-08	1,499E-08	1,5E-08	1,497E-08	1,501E-08	1,502E-08	1,499E-08	1,499E-08
261	Etano, 1,1,1-tricloro, HCFC-140	Ar	kg	5,149E-08	5,149E-08	5,149E-08	5,149E-08	5,149E-08	5,149E-08	5,149E-08	5,149E-08
262	Etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Ar	kg	5,37E-06	5,372E-06	5,37E-06	5,37E-06	5,374E-06	5,373E-06	5,371E-06	5,37E-06
263	Etano, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Ar	kg	7,38E-10	7,402E-10	7,384E-10	7,383E-10	7,437E-10	7,42E-10	7,391E-10	7,373E-10
264	Etano, 1,2-dibromo-	Ar	kg	3,083E-09	3,083E-09	3,083E-09	3,083E-09	3,083E-09	3,083E-09	3,083E-09	3,083E-09
265	Etano, 1,2-dicloro-	Ar	kg	1,293E-06	1,3E-06	1,3E-06	1,293E-06	1,305E-06	1,305E-06	1,298E-06	1,298E-06
266	Etano, 1,2-dicloro-	Água	kg	7,94E-08	7,949E-08	7,948E-08	7,94E-08	7,957E-08	7,957E-08	7,946E-08	7,945E-08
267	Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Ar	kg	2,187E-07	2,191E-07	2,191E-07	2,188E-07	2,193E-07	2,194E-07	2,19E-07	2,191E-07
268	Etano, cloro	Ar	kg	1,079E-07	1,079E-07	1,079E-07	1,079E-07	1,079E-07	1,079E-07	1,079E-07	1,079E-07
269	Etano, hexafluoro-, HFC-116	Ar	kg	7,28E-07	7,291E-07	7,283E-07	7,281E-07	7,308E-07	7,301E-07	7,285E-07	7,277E-07
270	Etanol	Ar	kg	2,285E-05	2,279E-05	2,272E-05	2,286E-05	2,281E-05	2,274E-05	2,279E-05	2,272E-05
271	Etanol	Água	kg	2,832E-07	2,838E-07	2,833E-07	2,833E-07	2,85E-07	2,844E-07	2,835E-07	2,829E-07
272	Ethene	Ar	kg	0,0011152	0,0011154	0,0011154	0,0011152	0,0011155	0,0011155	0,0011153	0,0011153
273	Ethene	Água	kg	9,834E-06	9,892E-06	9,909E-06	9,834E-06	9,925E-06	9,942E-06	9,879E-06	9,895E-06
274	Ethene, chloro-	Ar	kg	5,303E-07	5,329E-07	5,329E-07	5,304E-07	5,352E-07	5,352E-07	5,321E-07	5,32E-07
275	Ethene, chloro-	Água	kg	5,604E-09	5,616E-09	5,61E-09	5,605E-09	5,633E-09	5,627E-09	5,611E-09	5,605E-09
276	Ethene, tetrachloro-	Ar	kg	1,176E-07	1,176E-07	1,176E-07	1,176E-07	1,176E-07	1,176E-07	1,176E-07	1,176E-07
277	Acetato de etilo	Ar	kg	2,793E-05	2,801E-05	2,794E-05	2,794E-05	2,814E-05	2,808E-05	2,797E-05	2,79E-05



Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
305	Formamida	Ar	kg	4,707E-11	4,708E-11	4,707E-11	4,707E-11	4,708E-11	4,708E-11	4,707E-11	4,707E-11
306	Formamida	Água	kg	1,13E-10	1,13E-10	1,13E-10	1,13E-10	1,13E-10	1,13E-10	1,13E-10	1,13E-10
307	Formato	Água	kg	5,637E-08	5,637E-08	5,637E-08	5,637E-08	5,637E-08	5,637E-08	5,637E-08	5,637E-08
308	Ácido fórmico	Ar	kg	9,546E-08	9,557E-08	9,543E-08	9,548E-08	9,579E-08	9,566E-08	9,55E-08	9,536E-08
309	Ácido fórmico	Água	kg	3,28E-11	3,28E-11	3,28E-11	3,28E-11	3,28E-11	3,28E-11	3,28E-11	3,28E-11
310	Furan	Ar	kg	1,718E-08	1,718E-08	1,717E-08	1,719E-08	1,72E-08	1,719E-08	1,718E-08	1,717E-08
311	Gálio, 0,014% em bauxita, em solo	Matéria prima	kg	1,153E-10	1,155E-10	1,156E-10	1,153E-10	1,156E-10	1,157E-10	1,155E-10	1,155E-10
312	Gás, mina, fora do gás, processo, mineração de carvão / m3	Matéria prima	m3	0,4750536	0,4751212	0,475129	0,4750555	0,475171	0,4751791	0,4751026	0,4751103
313	Gás, natural, no solo	Matéria prima	m3	9,3323383	9,3404004	9,3310407	9,3338341	9,3565537	9,3473967	9,3356018	9,3261189
314	Glutaraldeído	Água	kg	2,832E-07	2,831E-07	2,827E-07	2,832E-07	2,834E-07	2,83E-07	2,83E-07	2,826E-07
315	Glifosato	Solo	kg	3,113E-06	3,114E-06	3,114E-06	3,113E-06	3,116E-06	3,116E-06	3,114E-06	3,113E-06
316	Ouro, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	5,53E-08	5,546E-08	5,533E-08	5,532E-08	5,573E-08	5,56E-08	5,538E-08	5,525E-08
317	Ouro, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,014E-07	1,017E-07	1,015E-07	1,014E-07	1,022E-07	1,02E-07	1,016E-07	1,013E-07
318	Ouro, Au 1.4E-4%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,214E-07	1,218E-07	1,215E-07	1,215E-07	1,224E-07	1,221E-07	1,216E-07	1,213E-07
319	Ouro, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,855E-07	1,86E-07	1,856E-07	1,855E-07	1,869E-07	1,865E-07	1,857E-07	1,853E-07
320	Ouro, Au 4.3E-4%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	4,596E-08	4,61E-08	4,599E-08	4,598E-08	4,632E-08	4,621E-08	4,603E-08	4,592E-08
321	Ouro, Au 4.9E-5%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,101E-07	1,104E-07	1,102E-07	1,101E-07	1,109E-07	1,107E-07	1,102E-07	1,1E-07
322	Ouro, Au 6.7E-4%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,704E-07	1,709E-07	1,705E-07	1,705E-07	1,718E-07	1,714E-07	1,707E-07	1,703E-07
323	Ouro, Au 7.1E-4%, no minério, no solo	Matéria prima	kg	1,922E-07	1,927E-07	1,923E-07	1,923E-07	1,937E-07	1,932E-07	1,925E-07	1,92E-07
324	Ouro, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0,63%, Cu 0,38%, Pb 0,014%, no minério, no solo	Matéria prima	kg	1,152E-08	1,155E-08	1,152E-08	1,152E-08	1,161E-08	1,158E-08	1,153E-08	1,151E-08

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
325	Granito, no solo	Matéria prima	kg	1,007E-10	1,008E-10	1,007E-10	1,007E-10	1,01E-10	1,009E-10	1,008E-10	1,007E-10
326	Cascalho, no solo	Matéria prima	kg	44,348879	44,354749	44,350161	44,349975	44,364824	44,360461	44,352053	44,347456
327	Gesso, no solo	Matéria prima	kg	2,4166099	2,5868179	3,2763179	0,2172037	0,3453397	0,4560793	0,2006737	0,2246365
328	Calor, desperdício	Ar	MJ	2003,9808	2004,3648	2003,678	2004,086	2005,3812	2004,7095	2004,0794	2003,3849
329	Calor, desperdício	Água	MJ	31,194601	31,246349	31,253489	31,195815	31,283171	31,290504	31,232317	31,239387
330	Calor, desperdício	Solo	MJ	1,1913357	1,1925544	1,192749	1,1913661	1,1934047	1,1936055	1,1922349	1,1924292
331	Hélio	Ar	kg	1,903E-05	1,905E-05	1,904E-05	1,903E-05	1,907E-05	1,906E-05	1,904E-05	1,903E-05
332	Heptano	Ar	kg	7,222E-05	7,23E-05	7,225E-05	7,223E-05	7,241E-05	7,236E-05	7,226E-05	7,222E-05
333	Hexadecane	Água	kg	1,32E-07	1,32E-07	1,32E-07	1,32E-07	1,32E-07	1,32E-07	1,32E-07	1,32E-07
334	Hexano	Ar	kg	0,000222	0,0002223	0,0002222	0,000222	0,0002226	0,0002225	0,0002222	0,0002221
335	Ácido hexanóico	Água	kg	4,594E-07	4,594E-07	4,594E-07	4,594E-07	4,594E-07	4,594E-07	4,594E-07	4,594E-07
336	Hidrazina, metil-	Ar	kg	4,368E-07	4,368E-07	4,368E-07	4,368E-07	4,368E-07	4,368E-07	4,368E-07	4,368E-07
337	Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, cíclicos	Ar	kg	1,532E-07	1,729E-07	1,789E-07	1,532E-07	1,836E-07	1,896E-07	1,684E-07	1,744E-07
338	Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, não especificados	Ar	kg	0,0132147	0,0132146	0,0132142	0,0132148	0,0132148	0,0132145	0,0132145	0,0132142
339	Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, não especificados	Água	kg	4,257E-05	4,262E-05	4,259E-05	4,258E-05	4,269E-05	4,266E-05	4,26E-05	4,257E-05
340	Hidrocarbonetos, alifáticos, insaturados	Ar	kg	0,0013281	0,0013281	0,0013281	0,0013281	0,0013282	0,0013282	0,0013281	0,0013281
341	Hidrocarbonetos, alifáticos, insaturados	Água	kg	3,93E-06	3,935E-06	3,932E-06	3,931E-06	3,941E-06	3,938E-06	3,933E-06	3,93E-06
342	Hidrocarbonetos aromáticos	Ar	kg	8,201E-05	8,379E-05	8,423E-05	8,202E-05	8,485E-05	8,53E-05	8,335E-05	8,379E-05
343	Hidrocarbonetos aromáticos	Água	kg	0,0001764	0,0001766	0,0001765	0,0001764	0,0001769	0,0001768	0,0001765	0,0001764
344	Hidrocarbonetos, clorados	Ar	kg	7,688E-07	7,724E-07	7,723E-07	7,69E-07	7,755E-07	7,754E-07	7,713E-07	7,712E-07
345	Hidrocarbonetos, não especificados	Ar	kg	0,0093595	0,0090051	0,0093741	0,008828	0,0098721	0,0106868	0,007957	0,007675
346	Hidrocarbonetos, não especificados	Água	kg	5,23E-05	5,288E-05	5,299E-05	5,231E-05	5,325E-05	5,336E-05	5,273E-05	5,284E-05
347	Hidrogênio	Ar	kg	8,749E-05	9,259E-05	9,406E-05	8,751E-05	9,544E-05	9,691E-05	9,139E-05	9,285E-05
348	Hidrogênio-3, Tritio	Ar	Bq	2853,797	2858,6433	2859,4954	2853,9094	2861,9494	2862,825	2857,3932	2858,245
349	Hidrogênio-3, Tritio	Água	Bq	215902,5	216264,79	216328,14	215911,22	216512,8	216578,03	216171,49	216234,87







Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
429	Metano, bromoclorodifluoro-, Halon 1211	Ar	kg	4,258E-07	4,252E-07	4,244E-07	4,259E-07	4,254E-07	4,247E-07	4,252E-07	4,244E-07
430	Metano, bromotrifluoro-, Halon 1301	Ar	kg	2,031E-07	2,033E-07	2,031E-07	2,031E-07	2,035E-07	2,034E-07	2,032E-07	2,03E-07
431	Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Ar	kg	1,608E-06	1,606E-06	1,603E-06	1,608E-06	1,607E-06	1,605E-06	1,606E-06	1,603E-06
432	Metano, dicloro, HCC-30	Ar	kg	8,973E-07	8,973E-07	8,973E-07	8,973E-07	8,973E-07	8,973E-07	8,973E-07	8,973E-07
433	Metano, dicloro, HCC-30	Água	kg	4,741E-06	4,744E-06	4,74E-06	4,742E-06	4,751E-06	4,746E-06	4,742E-06	4,738E-06
434	Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Ar	kg	6,059E-09	6,158E-09	6,173E-09	6,061E-09	6,227E-09	6,243E-09	6,132E-09	6,147E-09
435	Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Ar	kg	5,044E-12	5,058E-12	5,047E-12	5,047E-12	5,082E-12	5,071E-12	5,051E-12	5,04E-12
436	Metano, fóssil	Ar	kg	0,3337223	0,3340992	0,3341388	0,3337321	0,3343786	0,3344195	0,3339934	0,3340322
437	Metano, monocloro, R-40	Ar	kg	1,363E-06	1,363E-06	1,363E-06	1,363E-06	1,363E-06	1,363E-06	1,363E-06	1,363E-06
438	Metano, monocloro, R-40	Água	kg	8,802E-11	8,802E-11	8,802E-11	8,802E-11	8,802E-11	8,802E-11	8,802E-11	8,802E-11
439	Metano, tetracloro, CFC-10	Ar	kg	1,463E-07	1,466E-07	1,466E-07	1,463E-07	1,467E-07	1,468E-07	1,465E-07	1,466E-07
440	Metano, tetrafluoro-, CFC-14	Ar	kg	6,091E-06	6,1E-06	6,094E-06	6,093E-06	6,114E-06	6,108E-06	6,096E-06	6,09E-06
441	Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Ar	kg	8,189E-12	8,212E-12	8,193E-12	8,193E-12	8,25E-12	8,232E-12	8,2E-12	8,181E-12
442	Metano, trifluoro-, HFC-23	Ar	kg	1,605E-09	1,609E-09	1,606E-09	1,606E-09	1,617E-09	1,614E-09	1,607E-09	1,604E-09
443	Ácido metanossulfônico	Ar	kg	2,397E-10	2,397E-10	2,397E-10	2,397E-10	2,397E-10	2,397E-10	2,397E-10	2,397E-10
444	Metanol	Ar	kg	0,0008639	0,0008632	0,0008624	0,000864	0,0008634	0,0008626	0,0008632	0,0008624
445	Metanol	Água	kg	5,005E-05	5,004E-05	5,003E-05	5,005E-05	5,005E-05	5,004E-05	5,004E-05	5,003E-05
446	Acetato de metilo	Ar	kg	9,704E-12	9,705E-12	9,704E-12	9,704E-12	9,705E-12	9,705E-12	9,704E-12	9,704E-12
447	Acetato de metilo	Água	kg	2,329E-11	2,329E-11	2,329E-11	2,329E-11	2,329E-11	2,329E-11	2,329E-11	2,329E-11
448	Acrilato de metilo	Ar	kg	1,764E-08	1,77E-08	1,765E-08	1,765E-08	1,778E-08	1,774E-08	1,767E-08	1,763E-08
449	Acrilato de metilo	Água	kg	3,447E-07	3,457E-07	3,449E-07	3,448E-07	3,473E-07	3,465E-07	3,452E-07	3,444E-07
450	Metil amina	Ar	kg	1,146E-10	1,146E-10	1,146E-10	1,146E-10	1,148E-10	1,147E-10	1,146E-10	1,145E-10
451	Metil amina	Água	kg	2,749E-10	2,752E-10	2,75E-10	2,75E-10	2,756E-10	2,754E-10	2,75E-10	2,748E-10
452	Borato de metilo	Ar	kg	1,122E-11	1,122E-11	1,122E-11	1,122E-11	1,122E-11	1,122E-11	1,122E-11	1,122E-11
453	Metil-etil-cetona	Ar	kg	2,893E-05	2,901E-05	2,894E-05	2,894E-05	2,914E-05	2,908E-05	2,897E-05	2,89E-05
454	Metil-etil-cetona	Água	kg	1,76E-10	1,76E-10	1,76E-10	1,76E-10	1,76E-10	1,76E-10	1,76E-10	1,76E-10
455	Formado de metilo	Ar	kg	8,087E-11	8,107E-11	8,091E-11	8,09E-11	8,14E-11	8,124E-11	8,097E-11	8,08E-11



Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
475	Naftalenos, alquilados, não especificados	Água	kg	1,593E-09	1,593E-09	1,593E-09	1,593E-09	1,593E-09	1,593E-09	1,593E-09	1,593E-09
476	Napropamida	Solo	kg	2,208E-08	2,208E-08	2,208E-08	2,208E-08	2,208E-08	2,208E-08	2,208E-08	2,208E-08
477	Níquel	Ar	kg	0,0002709	0,0002708	0,0002706	0,0002709	0,0002708	0,0002707	0,0002707	0,0002706
478	Níquel	Água	kg	5,75E-07	5,75E-07	5,75E-07	5,75E-07	5,75E-07	5,75E-07	5,75E-07	5,75E-07
479	Níquel	Solo	kg	5,686E-06	5,686E-06	5,686E-06	5,686E-06	5,687E-06	5,687E-06	5,686E-06	5,686E-06
480	Níquel, 1,13% em sulfureto, Ni 0,76% e Cu 0,76% em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	0,0025146	0,0025044	0,0024944	0,0025155	0,0025058	0,0024959	0,0025051	0,002495
481	Níquel, 1,98% em silicatos, 1,04% em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	0,0373855	0,037455	0,0374019	0,0373949	0,037567	0,0375151	0,0374205	0,0373666
482	Níquel, ion	Água	kg	0,0042233	0,0042264	0,0042264	0,0042234	0,004229	0,004229	0,0042254	0,0042255
483	Niobio-95	Ar	Bq	1,11E-06	1,11E-06	1,11E-06	1,11E-06	1,11E-06	1,11E-06	1,11E-06	1,11E-06
484	Niobio-95	Água	Bq	0,0121237	0,0121403	0,0121427	0,0121244	0,0121527	0,0121552	0,0121361	0,0121385
485	Nitrato	Ar	kg	3,36E-06	3,364E-06	3,365E-06	3,36E-06	3,367E-06	3,368E-06	3,363E-06	3,364E-06
486	Nitrato	Água	kg	0,0466256	0,046661	0,0466668	0,0466263	0,0466851	0,0466911	0,0466516	0,0466574
487	Compostos de nitrato	Água	kg	2,613E-12	2,613E-12	2,613E-12	2,613E-12	2,613E-12	2,613E-12	2,613E-12	2,613E-12
488	Ácido nítrico	Água	kg	5,861E-09	5,861E-09	5,861E-09	5,861E-09	5,861E-09	5,861E-09	5,861E-09	5,861E-09
489	Nitrito	Água	kg	2,759E-06	2,794E-06	2,803E-06	2,76E-06	2,814E-06	2,823E-06	2,786E-06	2,794E-06
490	Nitrobenzeno	Ar	kg	2,93E-10	2,93E-10	2,93E-10	2,93E-10	2,93E-10	2,93E-10	2,93E-10	2,93E-10
491	Nitrobenzeno	Água	kg	1,174E-09	1,174E-09	1,174E-09	1,174E-09	1,174E-09	1,174E-09	1,174E-09	1,174E-09
492	Azoto	Ar	kg	0,0451673	0,0384611	0,0325286	0,0460701	0,0413167	0,0362596	0,0387931	0,0323544
493	Azoto	Água	kg	0,0007444	0,0007364	0,0007282	0,0007451	0,0007377	0,0007296	0,0007368	0,0007286
494	Óxidos de nitrogênio	Ar	kg	0,6407228	0,6383609	0,6405025	0,6373409	0,6440663	0,6490679	0,6316149	0,6295819
495	Nitrogênio, ligação orgânica	Água	kg	9,54E-05	9,549E-05	9,537E-05	9,542E-05	9,57E-05	9,558E-05	9,543E-05	9,531E-05
496	Nitrogênio, total	Água	kg	1,813E-07	1,813E-07	1,813E-07	1,813E-07	1,813E-07	1,813E-07	1,813E-07	1,813E-07
497	NM VOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos, origem não especificada	Ar	kg	0,0554087	0,0554864	0,0554962	0,0554105	0,0555425	0,0555525	0,055465	0,0554746
498	Gases nobres, radioativos, não especificados	Ar	Bq	4842193,4	4850328,6	4851752,5	4842388,4	4855895,2	4857361	4848233,4	4849657,8

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
499	o-Cresol	Água	kg	6,291E-08	6,291E-08	6,291E-08	6,291E-08	6,291E-08	6,291E-08	6,291E-08	6,291E-08
500	o-xileno	Água	kg	3,844E-11	3,851E-11	3,845E-11	3,845E-11	3,864E-11	3,858E-11	3,847E-11	3,841E-11
501	Ocupação, arável, não irrigado	Matéria prima	m2a	0,0922845	0,0922856	0,092285	0,0922846	0,0922872	0,0922866	0,0922851	0,0922845
502	Ocupação, construção	Matéria prima	m2a	0,0045509	0,0045545	0,0045497	0,0045517	0,0045623	0,0045576	0,0045522	0,0045474
503	Ocupação, local de despejo	Matéria prima	m2a	0,2752405	0,2752954	0,2752888	0,2752438	0,2753492	0,275343	0,2752772	0,2752703
504	Ocupação, despejo, benthos	Matéria prima	m2a	0,0036812	0,0036801	0,003675	0,0036818	0,0036842	0,0036792	0,0036791	0,003674
505	Ocupação, floresta, intensivo	Matéria prima	m2a	0,0160944	0,0161121	0,0161054	0,0160959	0,0161337	0,0161273	0,016105	0,0160982
506	Ocupação, floresta, intensivo, normal	Matéria prima	m2a	458,27262	458,27388	458,27325	458,27276	458,27559	458,27499	458,27335	458,27271
507	Ocupação, floresta, intensivo, ciclo curto	Matéria prima	m2a	0,000233	0,000233	0,0002328	0,000233	0,0002332	0,000233	0,000233	0,0002328
508	Ocupação, área industrial	Matéria prima	m2a	0,2293021	0,2293251	0,2293009	0,2293161	0,2293874	0,2293678	0,2293206	0,2292981
509	Ocupação, área industrial, benthos	Matéria prima	m2a	3,305E-05	3,304E-05	3,299E-05	3,306E-05	3,307E-05	3,303E-05	3,303E-05	3,299E-05
510	Ocupação, área industrial, construída	Matéria prima	m2a	0,0883408	0,0884113	0,0883558	0,0883505	0,0885265	0,0884722	0,0883759	0,0883195
511	Ocupação, área industrial, vegetação	Matéria prima	m2a	0,0345832	0,034606	0,0345892	0,0345863	0,0346421	0,0346258	0,0345949	0,0345779
512	Ocupação, local de extração mineral	Matéria prima	m2a	0,1315012	0,1315352	0,131533	0,1315029	0,1315664	0,1315645	0,1315243	0,1315221
513	Ocupação, colheita permanente, fruta intensiva	Matéria prima	m2a	0,0003006	0,0003006	0,0003003	0,0003007	0,0003009	0,0003006	0,0003005	0,0003003
514	Ocupação, arbustos, esclerófilos	Matéria prima	m2a	0,0019461	0,0019476	0,0019468	0,0019463	0,0019497	0,001949	0,001947	0,0019462
515	Ocupação, área de trânsito, aterro de trilho	Matéria prima	m2a	0,044164	0,0441836	0,0441757	0,0441658	0,0442082	0,0442005	0,0441757	0,0441676
516	Ocupação, área de trânsito, rede ferroviária	Matéria prima	m2a	0,048835	0,0488567	0,0488479	0,0488369	0,0488838	0,0488753	0,0488478	0,0488389
517	Ocupação, área de trânsito, aterro rodoviário	Matéria prima	m2a	4,479418	4,4794322	4,479425	4,4794196	4,4794517	4,4794448	4,4794262	4,4794189
518	Ocupação, área de trânsito, rede rodoviária	Matéria prima	m2a	0,0536128	0,0536288	0,0536175	0,0536152	0,053654	0,0536431	0,0536213	0,0536099

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
519	Ocupação, urbana, construída de forma descontínua	Matéria prima	m2a	8,653E-05	8,653E-05	8,653E-05	8,653E-05	8,653E-05	8,653E-05	8,653E-05	8,653E-05
520	Ocupação, corpos d'água, artificiais	Matéria prima	m2a	0,0581584	0,0582163	0,0582247	0,0581599	0,0582576	0,0582662	0,0582009	0,0582092
521	Ocupação, cursos de água artificial	Matéria prima	m2a	0,0424987	0,0425245	0,0425243	0,0425001	0,0425472	0,0425472	0,0425168	0,0425165
522	Octadecane	Água	kg	3,261E-08	3,261E-08	3,261E-08	3,261E-08	3,261E-08	3,261E-08	3,261E-08	3,261E-08
523	Óleo, bruto, no solo	Matéria prima	kg	5,9865321	6,0238284	6,0300581	5,9871988	6,0491521	6,0554731	6,0139231	6,0200989
524	Óleos biogênicos	Solo	kg	0,0023829	0,0023829	0,0023829	0,0023829	0,0023829	0,0023829	0,0023829	0,0023829
525	Óleos, não especificados	Água	kg	0,0214181	0,0214414	0,0214262	0,0214209	0,0214764	0,0214615	0,0214305	0,021415
526	Óleos, não especificados	Solo	kg	0,0212453	0,0212703	0,0212547	0,0212483	0,0213071	0,0212918	0,0212588	0,0212429
527	Olivina, no chão	Matéria prima	kg	1,729E-07	2,411E-07	2,62E-07	1,729E-07	2,779E-07	2,988E-07	2,253E-07	2,463E-07
528	Orbencarb	Solo	kg	7,939E-08	7,94E-08	7,94E-08	7,939E-08	7,941E-08	7,941E-08	7,94E-08	7,939E-08
529	Ácidos orgânicos	Ar	kg	1,252E-09	1,252E-09	1,252E-09	1,252E-09	1,252E-09	1,252E-09	1,252E-09	1,252E-09
530	Substâncias orgânicas, não especificadas	Ar	kg	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05	1,63E-05
531	Ozônio	Ar	kg	0,000172	0,0001723	0,0001723	0,000172	0,0001725	0,0001725	0,0001722	0,0001722
532	p-Cresol	Água	kg	6,787E-08	6,787E-08	6,787E-08	6,787E-08	6,787E-08	6,787E-08	6,787E-08	6,787E-08
533	HAP, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	Ar	kg	5,61E-05	5,61E-05	5,609E-05	5,61E-05	5,611E-05	5,61E-05	5,61E-05	5,609E-05
534	HAP, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	Água	kg	2,46E-06	2,462E-06	2,461E-06	2,46E-06	2,465E-06	2,464E-06	2,461E-06	2,46E-06
535	Partículas, <2,5 um	Ar	kg	0,0898399	0,0898345	0,0898144	0,0898423	0,0898499	0,0898302	0,0898312	0,0898109
536	Partículas, > 10 um	Ar	kg	0,4063656	0,4063808	0,4063693	0,4063678	0,4064052	0,4063941	0,4063734	0,4063618
537	Partículas, > 2,5 um, e <10um	Ar	kg	0,2910793	0,2910838	0,2910767	0,2910805	0,2910948	0,2910878	0,2910807	0,2910735
538	Partículas, fuligem de diesel	Ar	kg	0,0019192	0,0018465	0,0019221	0,0018102	0,0020243	0,0021914	0,0016315	0,0015737
539	Partículas, não especificadas	Ar	kg	0,1570525	0,1570525	0,1570525	0,1570525	0,1570525	0,1570525	0,1570525	0,1570525
540	Pd 2.0E-4%, Pt 4.8E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% no minério, no solo	Matéria prima	kg	1,921E-08	1,93E-08	1,928E-08	1,921E-08	1,939E-08	1,938E-08	1,927E-08	1,925E-08

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
541	Pd, Pd 7.3E-4%, Pt 2.5E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E + 0%, Cu 3.2E + 0% no minério, no solo	Matéria prima	kg	4,615E-08	4,638E-08	4,634E-08	4,617E-08	4,66E-08	4,657E-08	4,63E-08	4,627E-08
542	Turfa, no solo	Matéria prima	kg	0,0002575	0,000269	0,0002721	0,0002575	0,0002756	0,0002788	0,0002662	0,0002694
543	Pentane	Ar	kg	0,0007504	0,0007504	0,0007495	0,0007505	0,0007512	0,0007504	0,0007502	0,0007493
544	Phenanthrene	Ar	kg	9,471E-05	9,471E-05	9,471E-05	9,471E-05	9,471E-05	9,471E-05	9,471E-05	9,471E-05
545	Phenanthrene	Água	kg	5,827E-10	5,827E-10	5,827E-10	5,827E-10	5,827E-10	5,827E-10	5,827E-10	5,827E-10
546	Phenanthrenes, alquilados, não especificados	Água	kg	6,605E-10	6,605E-10	6,605E-10	6,605E-10	6,605E-10	6,605E-10	6,605E-10	6,605E-10
547	Fenol	Ar	kg	1,743E-06	1,745E-06	1,744E-06	1,743E-06	1,749E-06	1,747E-06	1,744E-06	1,742E-06
548	Fenol	Água	kg	4,696E-05	4,704E-05	4,703E-05	4,697E-05	4,711E-05	4,71E-05	4,701E-05	4,7E-05
549	Fenol, 2,4-dicloro-	Ar	kg	4,234E-11	4,234E-11	4,234E-11	4,234E-11	4,235E-11	4,235E-11	4,234E-11	4,234E-11
550	Fenol, 2,4-dimetil-	Água	kg	6,125E-08	6,125E-08	6,125E-08	6,125E-08	6,125E-08	6,125E-08	6,125E-08	6,125E-08
551	Fenol, pentacloro	Ar	kg	1,308E-07	1,311E-07	1,311E-07	1,308E-07	1,312E-07	1,313E-07	1,31E-07	1,31E-07
552	Fenóis, não especificados	Ar	kg	1,303E-07	1,303E-07	1,303E-07	1,303E-07	1,303E-07	1,303E-07	1,303E-07	1,303E-07
553	Fenóis, não especificados	Água	kg	2,375E-07	2,375E-07	2,375E-07	2,375E-07	2,375E-07	2,375E-07	2,375E-07	2,375E-07
554	Fosfato	Água	kg	0,1498135	0,1499248	0,1499318	0,1498172	0,1500123	0,1500199	0,1498925	0,1498993
555	Fosfina	Ar	kg	1,344E-11	1,348E-11	1,345E-11	1,345E-11	1,355E-11	1,351E-11	1,346E-11	1,343E-11
556	Fósforo	Ar	kg	0,0001251	0,0001251	0,0001251	0,0001251	0,0001251	0,0001251	0,0001251	0,0001251
557	Fósforo	Água	kg	6,832E-05	6,834E-05	6,834E-05	6,832E-05	6,835E-05	6,835E-05	6,833E-05	6,833E-05
558	Fósforo	Solo	kg	0,0009985	0,0009985	0,0009985	0,0009985	0,0009985	0,0009985	0,0009985	0,0009985
559	Fósforo, 18% em apatite, 12% em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	0,0005558	0,000556	0,0005558	0,0005558	0,0005565	0,0005563	0,0005559	0,0005557
560	Fósforo, 18% em apatite, 4% em minério bruto, em solo	Matéria prima	kg	0,0010282	0,0010288	0,0010285	0,0010282	0,0010296	0,0010293	0,0010285	0,0010282
561	Ftalato, dioctil-	Ar	kg	1,875E-07	1,875E-07	1,875E-07	1,875E-07	1,875E-07	1,875E-07	1,875E-07	1,875E-07
562	Pirimicarbe	Solo	kg	1,751E-08	1,751E-08	1,751E-08	1,751E-08	1,751E-08	1,751E-08	1,751E-08	1,751E-08
563	Platina	Ar	kg	7,366E-12	7,378E-12	7,381E-12	7,367E-12	7,387E-12	7,389E-12	7,375E-12	7,377E-12
564	Plutonium-238	Ar	Bq	6,874E-08	6,886E-08	6,888E-08	6,874E-08	6,893E-08	6,896E-08	6,883E-08	6,885E-08
565	Plutonium-alpha	Ar	Bq	1,576E-07	1,578E-07	1,579E-07	1,576E-07	1,58E-07	1,581E-07	1,578E-07	1,578E-07

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
566	Polonium-210	Ar	Bq	5,2310109	5,239366	5,2406957	5,231193	5,2451503	5,2465113	5,2371515	5,2384733
567	Polonium-210	Água	Bq	5,9785963	5,9833136	5,9822818	5,9789138	5,9883383	5,9873505	5,981612	5,9805551
568	Bifenilos policlorados	Ar	kg	5,793E-07	5,793E-07	5,793E-07	5,793E-07	5,793E-07	5,793E-07	5,793E-07	5,793E-07
569	Potássio	Ar	kg	0,0095932	0,0095935	0,0095935	0,0095933	0,0095937	0,0095937	0,0095934	0,0095935
570	Potássio	Solo	kg	0,005566	0,0055661	0,005566	0,005566	0,0055662	0,0055662	0,005566	0,005566
571	Potássio-40	Ar	Bq	0,6776778	0,6787511	0,6789181	0,6777005	0,6794956	0,6796662	0,6784646	0,6786303
572	Potássio-40	Água	Bq	1,7680996	1,7708247	1,7711567	1,7681684	1,7728062	1,7731489	1,7700743	1,7704021
573	Potássio, íon	Água	kg	0,3010655	0,3012778	0,3012807	0,3010738	0,3014549	0,3014591	0,3012136	0,301216
574	Propanal	Ar	kg	9,806E-07	9,807E-07	9,807E-07	9,806E-07	9,807E-07	9,807E-07	9,807E-07	9,807E-07
575	Propanal	Água	kg	8,942E-11	8,943E-11	8,942E-11	8,942E-11	8,943E-11	8,943E-11	8,942E-11	8,942E-11
576	Propano	Ar	kg	0,0010044	0,0010041	0,001003	0,0010045	0,0010049	0,0010038	0,0010039	0,0010028
577	Propene	Ar	kg	9,509E-05	9,526E-05	9,529E-05	9,509E-05	9,536E-05	9,539E-05	9,521E-05	9,525E-05
578	Propene	Água	kg	1,039E-05	1,045E-05	1,046E-05	1,039E-05	1,048E-05	1,05E-05	1,043E-05	1,045E-05
579	Ácido propiônico	Ar	kg	4,86E-06	4,852E-06	4,842E-06	4,861E-06	4,855E-06	4,845E-06	4,852E-06	4,842E-06
580	Ácido propiônico	Água	kg	2,376E-10	2,376E-10	2,376E-10	2,376E-10	2,376E-10	2,376E-10	2,376E-10	2,376E-10
581	Propilamina	Ar	kg	1,491E-11	1,491E-11	1,491E-11	1,491E-11	1,491E-11	1,491E-11	1,491E-11	1,491E-11
582	Propilamina	Água	kg	3,578E-11	3,578E-11	3,578E-11	3,578E-11	3,578E-11	3,578E-11	3,578E-11	3,578E-11
583	Óxido de propileno	Ar	kg	4,531E-07	4,536E-07	4,532E-07	4,531E-07	4,544E-07	4,541E-07	4,533E-07	4,529E-07
584	Óxido de propileno	Água	kg	1,09E-06	1,091E-06	1,09E-06	1,09E-06	1,093E-06	1,092E-06	1,09E-06	1,089E-06
585	Protactinium-234	Ar	Bq	0,0709408	0,0710552	0,0710746	0,0709439	0,0711346	0,0711548	0,0710258	0,0710454
586	Protactinium-234	Água	Bq	1,3075605	1,3096695	1,3100294	1,3076177	1,3111318	1,3115049	1,3091286	1,3094897
587	Pt, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E + 0%, Cu 3.2E + 0% no minério, no solo	Matéria prima	kg	4,986E-10	5,005E-10	5,008E-10	4,986E-10	5,017E-10	5,021E-10	5E-10	5,003E-10
588	Pt, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2,4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% no minério, no solo	Matéria prima	kg	1,787E-09	1,794E-09	1,795E-09	1,787E-09	1,799E-09	1,8E-09	1,792E-09	1,794E-09
589	Pirena	Ar	kg	8,868E-10	8,868E-10	8,868E-10	8,868E-10	8,868E-10	8,868E-10	8,868E-10	8,868E-10
590	Espécies radioativas, emissores alfa	Água	Bq	0,0091748	0,0091802	0,0091775	0,0091753	0,0091875	0,0091849	0,0091779	0,0091751

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
591	Espécies radioativas, Nuclídeos, não especificados	Água	Bq	501,41031	502,23492	502,37925	501,43008	502,79916	502,94773	502,02254	502,16692
592	Espécies radioativas, outros emissores beta	Ar	Bq	3,8726491	3,8753545	3,8750028	3,8728284	3,8780479	3,8777284	3,8744616	3,8741036
593	Espécies radioativas, não especificadas	Ar	Bq	6708,3726	6708,3726	6708,3726	6708,3726	6708,3726	6708,3726	6708,3726	6708,3726
594	Radionuclídeos (incluindo o Radônio)	Ar	kg	9,125E-06	9,125E-06	9,125E-06	9,125E-06	9,125E-06	9,125E-06	9,125E-06	9,125E-06
595	Radium-224	Água	Bq	16,373931	16,39167	16,380598	16,376028	16,41773	16,406945	16,383482	16,37224
596	Radium-226	Ar	Bq	3,0470125	3,0518994	3,0527137	3,0471393	3,0552925	3,0561346	3,0506344	3,0514496
597	Radium-226	Água	Bq	843,77707	845,12048	845,32583	843,81621	846,07531	846,28936	844,76979	844,97556
598	Radium-226 / kg	Água	kg	7,905E-14	7,905E-14	7,905E-14	7,905E-14	7,905E-14	7,905E-14	7,905E-14	7,905E-14
599	Radium-228	Ar	Bq	0,8006836	0,8013412	0,8013378	0,8007105	0,8019024	0,801903	0,8011392	0,8011339
600	Radium-228	Água	Bq	32,751293	32,786779	32,764631	32,755489	32,83891	32,817336	32,770401	32,747912
601	Radium-228 / kg	Água	kg	4,043E-16	4,043E-16	4,043E-16	4,043E-16	4,043E-16	4,043E-16	4,043E-16	4,043E-16
602	Radon-220	Ar	Bq	25,483136	25,529626	25,537944	25,483981	25,560798	25,569254	25,517488	25,525761
603	Radon-222	Ar	Bq	9371615,5	9386730,6	9389310,1	9372025,2	9397211,3	9399885,4	9382854,4	9385442,1
604	Rh, Rh 2.0E-5%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Ni 2.3E + 0%, Cu 3.2E + 0% no minério, no solo	Matéria prima	kg	2,298E-10	2,312E-10	2,315E-10	2,298E-10	2,321E-10	2,324E-10	2,308E-10	2,311E-10
605	Rh, Rh 2.4E-5%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% no minério, no solo	Matéria prima	kg	7,196E-10	7,242E-10	7,251E-10	7,197E-10	7,271E-10	7,281E-10	7,23E-10	7,24E-10
606	Rênio, em minério bruto, em solo	Matéria prima	kg	4,664E-10	4,685E-10	4,689E-10	4,664E-10	4,697E-10	4,702E-10	4,679E-10	4,684E-10
607	Rubídio	Água	kg	3,275E-06	3,278E-06	3,276E-06	3,275E-06	3,284E-06	3,281E-06	3,277E-06	3,274E-06
608	Ruthenium-103	Ar	Bq	2,439E-07	2,44E-07	2,44E-07	2,439E-07	2,441E-07	2,441E-07	2,44E-07	2,44E-07
609	Ruthenium-103	Água	Bq	0,000237	0,0002371	0,0002371	0,000237	0,0002372	0,0002372	0,0002371	0,000237
610	Areia, não especificada, no solo	Matéria prima	kg	6,535E-05	6,786E-05	6,859E-05	6,536E-05	6,925E-05	6,998E-05	6,727E-05	6,801E-05
611	Escândio	Ar	kg	9,593E-07	9,607E-07	9,61E-07	9,594E-07	9,617E-07	9,619E-07	9,604E-07	9,606E-07
612	Escândio	Água	kg	9,958E-05	9,967E-05	9,966E-05	9,958E-05	9,975E-05	9,974E-05	9,964E-05	9,963E-05

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
613	Selênio	Ar	kg	2,49E-05	2,49E-05	2,489E-05	2,49E-05	2,49E-05	2,49E-05	2,49E-05	2,489E-05
614	Selênio	Água	kg	0,0001586	0,0001587	0,0001587	0,0001586	0,0001588	0,0001588	0,0001587	0,0001586
615	Shale, no chão	Matéria prima	kg	1,324E-06	1,883E-06	2,054E-06	1,324E-06	2,184E-06	2,355E-06	1,754E-06	1,925E-06
616	Silício	Ar	kg	0,0007682	0,0007684	0,0007684	0,0007682	0,0007685	0,0007685	0,0007683	0,0007683
617	Silício	Água	kg	0,6293675	0,6300526	0,6299614	0,6294067	0,6307248	0,6306392	0,6298205	0,6297264
618	Silício	Solo	kg	0,008358	0,0083582	0,0083582	0,008358	0,0083583	0,0083583	0,0083581	0,0083581
619	Tetrafluoreto de silício	Ar	kg	7,751E-09	7,756E-09	7,753E-09	7,752E-09	7,762E-09	7,76E-09	7,754E-09	7,751E-09
620	Prata	Ar	kg	3,849E-08	3,855E-08	3,856E-08	3,849E-08	3,86E-08	3,861E-08	3,854E-08	3,855E-08
621	Prata	Água	kg	4,592E-06	4,592E-06	4,592E-06	4,592E-06	4,592E-06	4,592E-06	4,592E-06	4,592E-06
622	Silver-110	Ar	Bq	2,417E-06	2,418E-06	2,418E-06	2,417E-06	2,42E-06	2,42E-06	2,418E-06	2,418E-06
623	Silver-110	Água	Bq	1,272858	1,2740317	1,2741405	1,27296	1,2750459	1,2751869	1,2737578	1,273878
624	Prata, 0,007% em sulfureto, Ag 0,004%, Pb, Zn, Cd, In, em terra	Matéria prima	kg	1,232E-06	1,236E-06	1,233E-06	1,233E-06	1,242E-06	1,239E-06	1,234E-06	1,231E-06
625	Prata, 3,2 ppm em sulfureto, Ag 1,2ppm, Cu e Te, em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	8,793E-07	8,819E-07	8,798E-07	8,797E-07	8,86E-07	8,841E-07	8,806E-07	8,785E-07
626	Prata, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, no minério, no solo	Matéria prima	kg	8,117E-08	8,14E-08	8,122E-08	8,12E-08	8,179E-08	8,161E-08	8,128E-08	8,109E-08
627	Prata, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,854E-07	1,859E-07	1,855E-07	1,855E-07	1,868E-07	1,864E-07	1,857E-07	1,852E-07
628	Prata, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,817E-07	1,822E-07	1,818E-07	1,818E-07	1,831E-07	1,827E-07	1,82E-07	1,815E-07
629	Prata, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0,63%, Cu 0,38%, Pb 0,014%, em minério, no solo	Matéria prima	kg	1,199E-07	1,202E-07	1,2E-07	1,199E-07	1,208E-07	1,205E-07	1,201E-07	1,198E-07
630	Silver, ion	Água	kg	2,97E-06	2,975E-06	2,972E-06	2,971E-06	2,982E-06	2,979E-06	2,973E-06	2,97E-06
631	Sódio	Ar	kg	0,0006159	0,0006158	0,0006156	0,0006159	0,0006158	0,0006157	0,0006158	0,0006156
632	Sódio	Solo	kg	0,0003939	0,0003942	0,0003938	0,000394	0,0003948	0,0003944	0,000394	0,0003936
633	Sódio-24	Água	Bq	0,0084968	0,0085007	0,0085003	0,0084977	0,0085056	0,0085055	0,0085	0,0084998
634	Clorato de sódio	Ar	kg	2,365E-08	2,371E-08	2,369E-08	2,365E-08	2,378E-08	2,376E-08	2,369E-08	2,366E-08
635	Cloreto de sódio, no solo	Matéria prima	kg	0,186905	0,1996769	0,2035675	0,1869103	0,2065938	0,2104853	0,1967201	0,2006104



Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
666	Sólidos suspensos, não especificados	Água	kg	0,034989	0,0349917	0,0349815	0,0349904	0,0350043	0,0349942	0,0349884	0,034978
667	Sylvite, 25% em sylvinite, em solo	Matéria prima	kg	0,0004907	0,000491	0,0004908	0,0004908	0,0004914	0,0004912	0,0004909	0,0004907
668	Éter metílico de t-butilo	Ar	kg	2,352E-06	2,352E-06	2,352E-06	2,352E-06	2,352E-06	2,352E-06	2,352E-06	2,352E-06
669	Éter metílico de t-butilo	Água	kg	6,802E-07	6,81E-07	6,805E-07	6,803E-07	6,821E-07	6,816E-07	6,806E-07	6,802E-07
670	t-butilamina	Ar	kg	1,829E-10	1,829E-10	1,829E-10	1,829E-10	1,829E-10	1,829E-10	1,829E-10	1,829E-10
671	t-butilamina	Água	kg	4,389E-10	4,389E-10	4,389E-10	4,389E-10	4,39E-10	4,389E-10	4,389E-10	4,389E-10
672	Talco, no chão	Matéria prima	kg	7,656E-05	7,657E-05	7,655E-05	7,657E-05	7,66E-05	7,659E-05	7,657E-05	7,655E-05
673	Tântalo, 81,9% em tantalite, 1,6E-4% em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	9,71E-07	9,738E-07	9,716E-07	9,714E-07	9,785E-07	9,763E-07	9,724E-07	9,701E-07
674	Alcatrão	Ar	kg	1,032E-11	1,032E-11	1,032E-11	1,032E-11	1,032E-11	1,032E-11	1,032E-11	1,032E-11
675	Alcatrão	Água	kg	1,477E-13	1,477E-13	1,477E-13	1,477E-13	1,477E-13	1,477E-13	1,477E-13	1,477E-13
676	Tebutam	Solo	kg	5,231E-08	5,231E-08	5,231E-08	5,231E-08	5,232E-08	5,231E-08	5,231E-08	5,231E-08
677	Technetium-99m	Água	Bq	0,0258756	0,0258874	0,0258864	0,0258783	0,0259024	0,0259023	0,0258853	0,0258846
678	Teflubenzuron	Solo	kg	9,801E-10	9,802E-10	9,802E-10	9,801E-10	9,804E-10	9,803E-10	9,802E-10	9,801E-10
679	Tellurium-123m	Água	Bq	0,0147451	0,0147694	0,0147735	0,0147457	0,0147862	0,0147905	0,0147631	0,0147673
680	Tellurium-132	Água	Bq	6,503E-05	6,506E-05	6,505E-05	6,503E-05	6,509E-05	6,509E-05	6,505E-05	6,505E-05
681	Tellurium, 0,5ppm em sulfeto, Te 0.2ppm, Cu e Ag, em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	1,319E-07	1,323E-07	1,32E-07	1,319E-07	1,329E-07	1,326E-07	1,321E-07	1,318E-07
682	Terpenos	Ar	kg	7,54E-09	7,54E-09	7,534E-09	7,541E-09	7,547E-09	7,541E-09	7,538E-09	7,532E-09
683	Tetradecane	Água	kg	5,3E-08	5,3E-08	5,3E-08	5,3E-08	5,3E-08	5,3E-08	5,3E-08	5,3E-08
684	Tálio	Ar	kg	4,889E-08	4,89E-08	4,889E-08	4,889E-08	4,892E-08	4,891E-08	4,89E-08	4,889E-08
685	Tálio	Água	kg	6,417E-06	6,425E-06	6,421E-06	6,418E-06	6,435E-06	6,431E-06	6,421E-06	6,417E-06
686	Thiram	Solo	kg	3,433E-11	3,433E-11	3,43E-11	3,433E-11	3,436E-11	3,433E-11	3,432E-11	3,429E-11
687	Tório	Ar	kg	1,071E-07	1,071E-07	1,071E-07	1,071E-07	1,072E-07	1,072E-07	1,071E-07	1,071E-07
688	Thorium-228	Ar	Bq	0,1632407	0,1634715	0,1635028	0,1632461	0,1636363	0,1636684	0,1634087	0,1634397
689	Thorium-228	Água	Bq	65,535858	65,606839	65,562542	65,54425	65,711108	65,667959	65,574079	65,529102
690	Thorium-230	Ar	Bq	0,277117	0,2775481	0,2776157	0,2771293	0,2778529	0,2779233	0,277436	0,2775037
691	Thorium-230	Água	Bq	178,40402	178,69177	178,74088	178,41182	178,89129	178,94219	178,61798	178,66724

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
692	Thorium-232	Ar	Bq	0,2097933	0,2101343	0,2101891	0,2098003	0,2103691	0,210425	0,2100437	0,2100981
693	Thorium-232	Água	Bq	0,2576146	0,2580825	0,2581648	0,2576233	0,2583976	0,2584814	0,25796	0,2580419
694	Thorium-234	Ar	Bq	0,0709543	0,0710687	0,0710881	0,0709574	0,0711481	0,0711683	0,0710393	0,0710588
695	Thorium-234	Água	Bq	1,3077046	1,3098138	1,3101738	1,3077618	1,3112763	1,3116494	1,3092729	1,309634
696	Lata	Ar	kg	1,24E-06	1,243E-06	1,241E-06	1,241E-06	1,246E-06	1,245E-06	1,242E-06	1,24E-06
697	Lata	Água	kg	4,617E-07	4,617E-07	4,617E-07	4,617E-07	4,617E-07	4,617E-07	4,617E-07	4,617E-07
698	Lata	Solo	kg	1,696E-09	1,765E-09	1,786E-09	1,696E-09	1,803E-09	1,824E-09	1,749E-09	1,769E-09
699	Estanho, 79% em cassiterite, 0,1% em minério bruto, em solo	Matéria prima	kg	6,05E-05	6,063E-05	6,053E-05	6,052E-05	6,083E-05	6,073E-05	6,056E-05	6,046E-05
700	Estanho	Água	kg	3,693E-05	3,702E-05	3,699E-05	3,693E-05	3,713E-05	3,71E-05	3,698E-05	3,695E-05
701	TiO2, 54% em ilmenite, 2,6% em minério bruto, no solo	Matéria prima	kg	0,0018952	0,0018984	0,0018972	0,0018955	0,0019024	0,0019012	0,0018971	0,0018959
702	TiO2, 95% em rutilo, 0,40% em minério bruto, em solo	Matéria prima	kg	9,317E-09	9,334E-09	9,321E-09	9,32E-09	9,362E-09	9,349E-09	9,326E-09	9,312E-09
703	Titânio	Ar	kg	3,442E-05	3,445E-05	3,445E-05	3,442E-05	3,447E-05	3,447E-05	3,444E-05	3,445E-05
704	Titânio	Solo	kg	0,0001393	0,0001393	0,0001393	0,0001393	0,0001393	0,0001393	0,0001393	0,0001393
705	Titânio, íon	Água	kg	0,0015901	0,0015926	0,0015924	0,0015902	0,0015948	0,0015947	0,0015918	0,0015917
706	TOC, carbono orgânico total	Água	kg	0,0928619	0,0929054	0,0928889	0,0928658	0,0929587	0,0929427	0,092888	0,0928712
707	Tolueno	Ar	kg	0,0002961	0,0002961	0,0002959	0,0002961	0,0002962	0,0002961	0,000296	0,0002959
708	Tolueno	Água	kg	4,417E-05	4,422E-05	4,419E-05	4,417E-05	4,428E-05	4,426E-05	4,419E-05	4,417E-05
709	Tolueno, 2-cloro-	Ar	kg	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10	1,35E-10
710	Tolueno, 2-cloro-	Água	kg	2,363E-10	2,363E-10	2,363E-10	2,363E-10	2,363E-10	2,363E-10	2,363E-10	2,363E-10
711	Tolueno, 2,4-dinitro-	Ar	kg	7,194E-10	7,194E-10	7,194E-10	7,194E-10	7,194E-10	7,194E-10	7,194E-10	7,194E-10
712	Transformação, de culturas arvenses	Matéria prima	m2	2,479E-05	2,484E-05	2,483E-05	2,479E-05	2,489E-05	2,488E-05	2,482E-05	2,482E-05
713	Transformação, de culturas arvenses, não irrigadas	Matéria prima	m2	0,170547	0,1705491	0,1705479	0,1705473	0,170552	0,1705509	0,1705482	0,170547
714	Transformação, de cultivo, não irrigado, em pousio	Matéria prima	m2	3,606E-06	3,615E-06	3,612E-06	3,607E-06	3,625E-06	3,622E-06	3,611E-06	3,609E-06
715	Transformação, do local de despejo, aterro de material	Matéria prima	m2	0,0003057	0,0003059	0,0003058	0,0003058	0,0003061	0,000306	0,0003058	0,0003057

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
716	Transformação, do local de despejo, aterro de material residual	Matéria prima	m2	7,593E-05	7,607E-05	7,603E-05	7,594E-05	7,622E-05	7,619E-05	7,602E-05	7,598E-05
717	Transformação, do local de despejo, aterro sanitário	Matéria prima	m2	3,251E-06	3,247E-06	3,24E-06	3,257E-06	3,261E-06	3,257E-06	3,251E-06	3,246E-06
718	Transformação, do local de despejo, compartimento escabio	Matéria prima	m2	4,182E-06	4,186E-06	4,188E-06	4,182E-06	4,189E-06	4,19E-06	4,185E-06	4,186E-06
719	Transformação, da floresta	Matéria prima	m2	0,008629	0,0086332	0,0086251	0,0086302	0,0086448	0,0086368	0,0086299	0,0086217
720	Transformação, de floresta, extensa	Matéria prima	m2	3,0786751	3,0786852	3,0786798	3,0786763	3,0786993	3,0786941	3,0786809	3,0786754
721	Transformação, de floresta, intensiva, de corte transparente	Matéria prima	m2	8,322E-06	8,322E-06	8,315E-06	8,323E-06	8,33E-06	8,323E-06	8,321E-06	8,313E-06
722	Transformação, da área industrial	Matéria prima	m2	7,747E-05	7,747E-05	7,74E-05	7,748E-05	7,753E-05	7,747E-05	7,745E-05	7,739E-05
723	Transformação, da área industrial, benthos	Matéria prima	m2	2,621E-07	2,617E-07	2,612E-07	2,621E-07	2,618E-07	2,613E-07	2,617E-07	2,612E-07
724	Transformação, de área industrial, construída	Matéria prima	m2	3,66E-07	3,662E-07	3,661E-07	3,66E-07	3,665E-07	3,664E-07	3,661E-07	3,66E-07
725	Transformação, da área industrial, vegetação	Matéria prima	m2	6,244E-07	6,248E-07	6,246E-07	6,244E-07	6,253E-07	6,251E-07	6,246E-07	6,244E-07
726	Transformação, do local de extração mineral	Matéria prima	m2	0,0012507	0,0012514	0,0012513	0,0012507	0,0012522	0,0012521	0,0012512	0,0012511
727	Transformação, de pastagem e prado	Matéria prima	m2	0,0008243	0,0008249	0,0008246	0,0008244	0,0008258	0,0008255	0,0008247	0,0008244
728	Transformação, de pastagem e prado, intensiva	Matéria prima	m2	0,0001392	0,0001392	0,0001392	0,0001392	0,0001392	0,0001392	0,0001392	0,0001392
729	Transformação, do mar e oceano	Matéria prima	m2	0,0036854	0,0036842	0,0036792	0,003686	0,0036884	0,0036834	0,0036833	0,0036782
730	Transformação, de arbustos, esclerófilos	Matéria prima	m2	0,0004954	0,0004959	0,0004958	0,0004955	0,0004964	0,0004963	0,0004957	0,0004956
731	Transformação, da floresta tropical	Matéria prima	m2	8,322E-06	8,322E-06	8,315E-06	8,323E-06	8,33E-06	8,323E-06	8,321E-06	8,313E-06
732	Transformação, de desconhecido	Matéria prima	m2	0,0193171	0,0193212	0,0193193	0,0193177	0,0193269	0,0193251	0,0193196	0,0193177

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
733	Transformação, para cultivar	Matéria prima	m2	0,0009774	0,0009774	0,0009766	0,0009775	0,000978	0,0009773	0,0009772	0,0009765
734	Transformação, para culturas arvenses, não irrigadas	Matéria prima	m2	0,1706892	0,1706913	0,1706902	0,1706895	0,1706942	0,1706931	0,1706904	0,1706892
735	Transformação, para cultivo, sem irrigação, em pousio	Matéria prima	m2	7,858E-06	7,872E-06	7,865E-06	7,859E-06	7,892E-06	7,885E-06	7,866E-06	7,859E-06
736	Transformação, para despejar o site	Matéria prima	m2	0,002229	0,0022294	0,0022294	0,002229	0,0022298	0,0022298	0,0022293	0,0022293
737	Transformação, para despejar o site, benthos	Matéria prima	m2	0,0036812	0,0036801	0,003675	0,0036818	0,0036842	0,0036792	0,0036791	0,003674
738	Transformação, para despejar o local, aterro de material inerte	Matéria prima	m2	0,0003057	0,0003059	0,0003058	0,0003058	0,0003061	0,000306	0,0003058	0,0003057
739	Transformação, para despejar o local, aterro de material residual	Matéria prima	m2	7,593E-05	7,607E-05	7,604E-05	7,594E-05	7,622E-05	7,619E-05	7,602E-05	7,598E-05
740	Transformação, aterro sanitário, aterro sanitário	Matéria prima	m2	3,251E-06	3,247E-06	3,24E-06	3,257E-06	3,261E-06	3,257E-06	3,251E-06	3,246E-06
741	Transformação, para despejar o local, compartimento escabio	Matéria prima	m2	4,182E-06	4,186E-06	4,188E-06	4,182E-06	4,189E-06	4,19E-06	4,185E-06	4,186E-06
742	Transformação, para floresta	Matéria prima	m2	0,0006917	0,000692	0,0006918	0,0006917	0,0006925	0,0006923	0,0006919	0,0006917
743	Transformação, para floresta, intensiva	Matéria prima	m2	0,0001072	0,0001073	0,0001073	0,0001072	0,0001075	0,0001074	0,0001073	0,0001072
744	Transformação, para floresta, intensiva, desobstruída	Matéria prima	m2	8,322E-06	8,322E-06	8,315E-06	8,323E-06	8,33E-06	8,323E-06	8,321E-06	8,313E-06
745	Transformação, para floresta, intensiva, normal	Matéria prima	m2	3,04871	3,0487199	3,0487146	3,0487112	3,0487337	3,0487286	3,0487156	3,0487103
746	Transformação, floresta, intensivo, ciclo curto	Matéria prima	m2	8,322E-06	8,322E-06	8,315E-06	8,323E-06	8,33E-06	8,323E-06	8,321E-06	8,313E-06
747	Transformação, heterogênea, agrícola	Matéria prima	m2	0,0004038	0,0004039	0,0004035	0,0004039	0,0004044	0,000404	0,0004038	0,0004033
748	Transformação, para área industrial	Matéria prima	m2	0,0061304	0,0061307	0,0061305	0,0061306	0,0061314	0,0061313	0,0061307	0,0061305
749	Transformação, para área industrial, benthos	Matéria prima	m2	4,182E-06	4,188E-06	4,182E-06	4,183E-06	4,2E-06	4,193E-06	4,185E-06	4,178E-06



Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
768	Trimetilamina	Água	kg	4,122E-11	4,122E-11	4,122E-11	4,122E-11	4,122E-11	4,122E-11	4,122E-11	4,122E-11
769	Tungstênio	Ar	kg	9,697E-08	9,713E-08	9,715E-08	9,698E-08	9,724E-08	9,726E-08	9,709E-08	9,711E-08
770	Tungstênio	Água	kg	4,75E-05	4,759E-05	4,753E-05	4,752E-05	4,773E-05	4,767E-05	4,755E-05	4,748E-05
771	Ulexite, no chão	Matéria prima	kg	5,309E-06	5,319E-06	5,319E-06	5,309E-06	5,327E-06	5,328E-06	5,316E-06	5,316E-06
772	Urânio	Ar	kg	6,868E-08	6,869E-08	6,869E-08	6,868E-08	6,87E-08	6,87E-08	6,868E-08	6,868E-08
773	Uranium-234	Ar	Bq	0,8395995	0,8409379	0,8411602	0,8396365	0,8418719	0,8421026	0,8405931	0,8408161
774	Uranium-234	Água	Bq	1,5690481	1,5715788	1,5720107	1,5691167	1,5733336	1,5737814	1,5709298	1,5713631
775	Uranium-235	Ar	Bq	0,0400111	0,0400756	0,0400866	0,0400128	0,0401203	0,0401318	0,040059	0,0400701
776	Uranium-235	Água	Bq	2,5889478	2,5931234	2,5938361	2,589061	2,5960188	2,5967576	2,5920526	2,5927675
777	Uranium-238	Ar	Bq	1,3674664	1,3696477	1,370003	1,367521	1,3711646	1,3715312	1,3690784	1,3694333
778	Uranium-238	Água	Bq	6,1273203	6,1355814	6,1363754	6,1276053	6,141893	6,1427425	6,1332959	6,1340846
779	Uranium alpha	Ar	Bq	3,8542513	3,8604683	3,8615294	3,8544197	3,8647789	3,8658789	3,858874	3,8599385
780	Uranium alpha	Água	Bq	75,331323	75,452819	75,473554	75,334616	75,537063	75,558558	75,421662	75,442463
781	Óxido de urânio, 332 GJ por kg, em minério	Matéria prima	kg	6,419E-06	6,419E-06	6,419E-06	6,419E-06	6,419E-06	6,419E-06	6,419E-06	6,419E-06
782	Urânio, no solo	Matéria prima	kg	0,0002888	0,0002894	0,0002895	0,0002888	0,0002897	0,0002899	0,0002892	0,0002893
783	Ureia	Água	kg	1,245E-10	1,245E-10	1,245E-10	1,245E-10	1,246E-10	1,246E-10	1,245E-10	1,245E-10
784	Vanádio	Ar	kg	0,0001595	0,0001589	0,0001583	0,0001596	0,0001591	0,0001584	0,000159	0,0001583
785	Vanádio	Água	kg	5,938E-08	5,938E-08	5,938E-08	5,938E-08	5,938E-08	5,938E-08	5,938E-08	5,938E-08
786	Vanádio	Solo	kg	3,987E-06	3,987E-06	3,987E-06	3,987E-06	3,987E-06	3,987E-06	3,987E-06	3,987E-06
787	Vanádio, íon	Água	kg	0,0002924	0,0002927	0,0002927	0,0002924	0,000293	0,000293	0,0002926	0,0002926
788	Vermiculita, no solo	Matéria prima	kg	1,546E-05	1,528E-05	1,511E-05	1,562E-05	1,557E-05	1,547E-05	1,542E-05	1,528E-05
789	Acetato de vinila	Ar	kg	1,953E-08	1,953E-08	1,953E-08	1,953E-08	1,953E-08	1,953E-08	1,953E-08	1,953E-08
790	COV, compostos orgânicos voláteis	Ar	kg	0,0039213	0,0039213	0,0039213	0,0039213	0,0039213	0,0039213	0,0039213	0,0039213
791	COV, compostos orgânicos voláteis, origem não especificada	Água	kg	0,0001179	0,000118	0,0001179	0,0001179	0,0001182	0,0001181	0,0001179	0,0001179
792	Volume ocupado, repositório final para resíduos radioativos de baixa atividade	Matéria prima	m3	5,948E-07	5,957E-07	5,959E-07	5,948E-07	5,964E-07	5,966E-07	5,955E-07	5,957E-07
793	Volume ocupado, repositório	Matéria prima	m3	1,475E-07	1,478E-07	1,478E-07	1,476E-07	1,48E-07	1,48E-07	1,477E-07	1,478E-07

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V- ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
794	Volume occupied, reservoir	Matéria prima	m3y	0,3970109	0,3975345	0,3975875	0,3970346	0,3979428	0,3980017	0,3973953	0,3974492
795	Volume occupied, underground deposit	Matéria prima	m3	5,502E-06	5,503E-06	5,503E-06	5,502E-06	5,505E-06	5,504E-06	5,503E-06	5,503E-06
796	Waste water/m3	Água	m3	0,1284	0,1284	0,1284	0,1284	0,1284	0,1284	0,1284	0,1284
797	Water	Ar	kg	0,0875142	0,0772988	0,0679833	0,088736	0,080746	0,0724025	0,0778495	0,0679703
798	Water, cooling, unspecified natural origin/m3	Matéria prima	m3	0,7769689	0,7818912	0,7832433	0,7769919	0,7847084	0,7860643	0,7807171	0,782068
799	Water, lake	Matéria prima	m3	0,0147918	0,0146249	0,0144686	0,0149454	0,0149009	0,0148023	0,0147567	0,0146274
800	Water, process, unspecified natural origin/m3	Matéria prima	m3	0,0194304	0,0182784	0,0150344	0,0220232	0,0173264	0,0131224	0,0213336	0,02002
801	Water, river	Matéria prima	m3	0,2035289	0,203259	0,2028318	0,2039862	0,2042274	0,2039713	0,2035878	0,2032401
802	Water, salt, ocean	Matéria prima	m3	0,0249231	0,0249545	0,0249501	0,024925	0,0249859	0,0249817	0,0249439	0,0249394
803	Water, salt, sole	Matéria prima	m3	0,0042067	0,0042111	0,0042083	0,0042073	0,0042176	0,0042149	0,0042091	0,0042063
804	Water, turbine use, unspecified natural origin	Matéria prima	m3	177,92166	178,18159	178,19792	177,93257	178,39042	178,40898	178,10826	178,1245
805	Water, unspecified natural origin/m3	Matéria prima	m3	0,6062208	0,6062982	0,6061877	0,6062383	0,6064749	0,606367	0,6062475	0,6061357
806	Water, well, in ground	Matéria prima	m3	0,113073	0,112731	0,1123739	0,1134294	0,1134021	0,1131789	0,1130234	0,1127289
807	Wood, hard, standing	Matéria prima	m3	0,0849105	0,0849108	0,0849108	0,0849106	0,084911	0,0849111	0,0849107	0,0849108
808	Wood, primary forest, standing	Matéria prima	m3	8,617E-08	8,617E-08	8,61E-08	8,618E-08	8,625E-08	8,618E-08	8,615E-08	8,608E-08
809	Wood, soft, standing	Matéria prima	m3	0,0005222	0,0005232	0,000523	0,0005223	0,0005242	0,000524	0,0005228	0,0005226
810	Wood, unspecified, standing/m3	Matéria prima	m3	3,942E-09	4,058E-09	4,091E-09	3,942E-09	4,122E-09	4,156E-09	4,03E-09	4,064E-09
811	Xenon-131m	Ar	Bq	29,333773	29,360181	29,36262	29,336131	29,383127	29,386317	29,35407	29,35678
812	Xenon-133	Ar	Bq	995,37659	996,19836	996,26035	995,46062	996,94281	997,03198	996,01232	996,08435
813	Xenon-133m	Ar	Bq	2,7030193	2,7070034	2,7076615	2,7031531	2,7098305	2,7105231	2,7059959	2,7066605
814	Xenon-135	Ar	Bq	403,35735	403,69569	403,7223	403,39112	403,99981	404,03731	403,61877	403,64939
815	Xenon-135m	Ar	Bq	245,58729	245,78451	245,79826	245,60832	245,96564	245,98622	245,7402	245,75649
816	Xenon-137	Ar	Bq	6,205169	6,2085476	6,2084465	6,2057868	6,2123866	6,2124942	6,2078878	6,20787
817	Xenon-138	Ar	Bq	49,623544	49,654887	49,655287	49,628252	49,687576	49,689548	49,648371	49,649386
818	Xylene	Ar	kg	0,0001752	0,0001754	0,0001754	0,0001752	0,0001756	0,0001756	0,0001753	0,0001753

Nº	Substância	Compartimento	Unidade	Pilar REF CP IV	Pilar 15%RCD CP IV	Pilar 30%RCD CP IV	Pilar REF CPV-ARI	Pilar 15%RCD CP V-ARI	Pilar 30%RCD CPV-ARI	Pilar 15%RCD25%CCA CPV-ARI	Pilar 30%RCD25%CCA CPV-ARI
819	Xylene	Água	kg	3,522E-05	3,526E-05	3,524E-05	3,523E-05	3,531E-05	3,529E-05	3,524E-05	3,522E-05
820	Yttrium	Água	kg	1,474E-08	1,474E-08	1,474E-08	1,474E-08	1,474E-08	1,474E-08	1,474E-08	1,474E-08
821	Zinc	Ar	kg	0,0002455	0,0002456	0,0002455	0,0002455	0,0002457	0,0002456	0,0002455	0,0002455
822	Zinc	Água	kg	4,22E-06	4,22E-06	4,22E-06	4,22E-06	4,22E-06	4,22E-06	4,22E-06	4,22E-06
823	Zinc	Solo	kg	0,0001859	0,0001859	0,0001859	0,0001859	0,0001859	0,0001859	0,0001859	0,0001859
824	Zinc-65	Ar	Bq	4,669E-05	4,671E-05	4,671E-05	4,67E-05	4,674E-05	4,674E-05	4,671E-05	4,671E-05
825	Zinc-65	Água	Bq	0,1152015	0,1152538	0,115249	0,1152135	0,1153203	0,1153196	0,1152445	0,1152414
826	Zinc, 9.0% in sulfide, Zn 5.3%, Pb, Ag, Cd, In, in ground	Matéria prima	kg	0,0064081	0,0064206	0,0064104	0,0064099	0,0064413	0,0064314	0,0064142	0,006404
827	Zinc, ion	Água	kg	0,006924	0,00693	0,0069278	0,0069246	0,0069374	0,0069352	0,0069277	0,0069254
828	Zirconium	Ar	kg	1,107E-06	1,107E-06	1,107E-06	1,107E-06	1,107E-06	1,107E-06	1,107E-06	1,107E-06
829	Zirconium-95	Ar	Bq	4,564E-05	4,566E-05	4,566E-05	4,565E-05	4,569E-05	4,569E-05	4,566E-05	4,566E-05
830	Zirconium-95	Água	Bq	0,001334	0,0013346	0,0013346	0,0013342	0,0013354	0,0013354	0,0013345	0,0013345
831	Zirconium, 50% in zircon, 0.39% in crude ore, in ground	Matéria prima	kg	1,326E-06	1,329E-06	1,326E-06	1,326E-06	1,336E-06	1,333E-06	1,327E-06	1,324E-06