

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

FELIPE ZANELATO COELHO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA *CRADLE-TO-GATE* DE TRAÇOS DE
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS E
SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS**

VITÓRIA

2016

FELIPE ZANELATO COELHO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA *CRADLE-TO-GATE* DE TRAÇOS DE
CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS E
SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon
Nogueira da Gama

VITÓRIA

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C672a Coelho, Felipe Zanellato, 1988-
Avaliação do ciclo de vida *cradle-to-gate* de traços de concretos autoadensáveis com incorporação de resíduos e subprodutos industriais / Indicação de responsabilidade. – 2016. 174 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Concreto. 2. Resíduos. 3. Subprodutos. 4. Impacto ambiental. 5. Avaliação do ciclo de vida. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

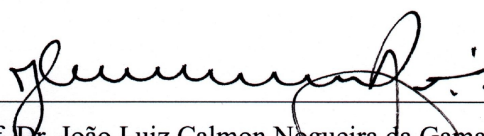
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

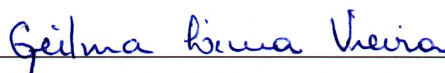
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA “CRADLE-TO-GATE” DE TRAÇOS DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS

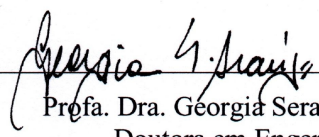
Felipe Zanellato Coelho

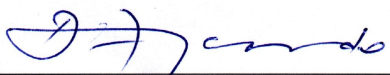
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **05 de setembro de 2016** por:


Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES


Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES


Profa. Dra. Georgia Serafim Araújo
Doutora em Engenharia Civil
Membro Externo - IFES – Campus Vitória


Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves
Doutor em Engenharia do Tratamento de Águas
Membro Externo - UFES

Vitória – ES, setembro de 2016

Dedico este trabalho à minha Família, em especial ao meu filho Heitor, que chegou ao mundo no meio dessa empreitada trazendo mais motivação para dar continuidade aos meus projetos. Aos mestres, por compartilharem seus conhecimentos, e aos meus amigos, por serem compreensivos nessa fase de abdicação.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são para aquelas pessoas que colaboraram de forma efetiva para a concretização desse trabalho.

Agradeço primeiramente a minha Mãe, seus cuidados e sua dedicação me deram em alguns momentos a esperança para seguir em frente.

A minha Esposa, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

Ao meu Filho, maior inspiração da minha vida, e que mesmo sem saber ao menos andar ou falar, me motiva a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Aos meus Irmãos que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu concluísse essa importante e fundamental etapa em minha vida.

Ao meu Orientador Dr. João Luiz Calmon, por acreditar no meu potencial, e compartilhar seus conhecimentos, sempre me incentivando a ir além e me proporcionando a experiência de uma produção científica de qualidade.

Ao meu colega Robson Zucão Mello, por toda colaboração durante as pesquisas.

Agradeço à ACV Brasil pelo fornecimento do *software SimaPro* para a realização deste estudo.

Agradeço ao Thalles e à Professora Cristina do LPP/UFES pelos treinamentos iniciais no *software SimaPro*.

À UFES pela estrutura e possibilidade de fazer um curso de Mestrado de forma gratuita.

À ACAPES pelo incentivo financeiro.

À FAPES pelo fomento à pesquisa.

Finalmente a todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram ao longo desta caminhada.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

ZANELATO, F.C. **Avaliação do ciclo de vida *cradle-to-gate* de traços de concretos autoadensáveis com incorporação de resíduos e subprodutos industriais.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 174p., 2016.

RESUMO

Vários estudos avaliam o desempenho técnico da incorporação de resíduos e subprodutos industriais nos traços de concreto (ecoconcretos, concretos verdes, concretos ecológicos). Porém, para decidir qual mistura apresenta a menor carga ambiental é necessário fazer uma análise completa de todo seu ciclo de vida. A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia utilizada para examinar os potenciais impactos ambientais e os recursos empregados ao longo do ciclo de vida de um produto. Deste modo, a gestão dos impactos ambientais é abordada desde a extração da matéria-prima até as fases de produção, utilização, descarte e reciclagem. Assim, o objetivo desta dissertação consiste em associar a produção de Concreto Autoadensável (CAA) incorporando resíduos e subprodutos industriais com o conceito de ciclo de vida, utilizando a metodologia de ACV para fazer comparações de traços em um cenário específico. Para isso, a pesquisa utilizou traços de CAAs verdes, com desempenhos técnicos já comprovados em artigos científicos, mas em que o desempenho ambiental não foi analisado. Para avaliar o desempenho ambiental, os traços foram separados em 3 classes de resistência (1A, 1B e 2) e analisados com o Software *SIMAPRO*, método de avaliação de impacto *IMPACT 2002+*, banco de dados *ECOINVENT* e unidade funcional de 1 m³ com o limite do sistema *cradle-to-gate*. Os resultados mostraram que, nas três classes de resistência analisadas, as categorias de danos mais afetadas foram a Saúde Humana, as Mudanças Climáticas e os Recursos Energéticos, como consequência das altas emissões de partículas inorgânicas que afetam a saúde humana, da emissão de gases do efeito estufa e do consumo de energia não renovável, respectivamente. Em resumo, os CAAs verdes apresentam ganhos ambientais significativos que podem contribuir para minimizar os problemas da gestão de resíduos, reduzir o esgotamento dos recursos naturais e promover o consumo verde.

Palavras-chave: Concretos Autoadensáveis (CAA). Avaliação do ciclo de vida (ACV). Resíduos. Subprodutos Industriais. *SimaPro*. Impacto ambiental.

ABSTRACT

Several studies evaluate the technical performance of incorporating wastes and industrial by-products into concrete mixtures (eco-concrete, green concrete, ecological concrete). However, to decide which mixture has the lowest environmental load is necessary to make a complete analysis of its entire life cycle. The life cycle assessment (LCA) is a methodology for assessing the potential environmental impacts and resources used throughout a product's life cycle. Thus, the management of environmental impacts is approached from the extraction of raw materials to stages of production, use, disposal and recycling. Therefore, the aim of this work is to associate the production of self-compacting concrete (SCC) with the incorporation of wastes and industrial by-products with the concept of life cycle, using the LCA methodology to make comparisons of mixtures in a specific scenario. For such, this research used green SCC's mixtures, with technical performances proved in scientific articles, in which the environmental performance was not analyzed. To evaluate the environmental performance, the mixtures were divided into 3 strength classes (1A, 1B and 2) and analyzed with the software SIMAPRO, IMPACT 2002+ impact assessment method, Ecoinvent database and functional unit of 1 m³, with the cradle-to-gate system boundaries. The results show that in the three strength classes analyzed the damage categories most affected were Human Health, Climate Change and Energy Resources, as a result of high emissions of inorganic particles that affect human health, greenhouse gas emissions and consumption of non-renewable energy, respectively. In summary, the green SCC's have significant environmental gains that can help minimize the problems of waste management, reduce the depletion of natural resources and promote green consumption.

Keywords: *Self-compacting concrete (SCC). Life Cycle Assessment (LCA). Wastes. Industrial byproducts. SimaPro. Environmental impact.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de vida do Concreto.....	44
Figura 2- Fases da ACV.....	48
Figura 3 - Entradas e saídas do Inventário do Ciclo de Vida.....	50
Figura 4 - Abordagem <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>	53
Figura 5 – Esquema Geral do método <i>IMPACT 2002+</i> ligando as categorias de impacto (<i>midpoints</i>) a suas respectivas categorias de danos (<i>endpoints</i>), com base em Joillet <i>et al.</i> (2003).....	73
Figura 6 – Fluxo de CO ₂ do inventário (emissão) ao dano ambiental.....	74
Figura 7 - Fronteiras do sistema.....	80
Figura 8 - Caracterização dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> para o consumo médio de cada material.....	94
Figura 9 - Caracterização dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> para o consumo médio de cada material.....	96
Figura 10 - Caracterização dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> de 12 traços da Classe 1A.....	98
Figura 11 - Comparação da resistência à compressão em relação à pontuação única de 12 traços da Classe 1A.....	101
Figura 12 - Resultado da pontuação única total separada por <i>endpoint</i> com o indicador de intensidade de impacto total de todos os traços da Classe 1A.....	103
Figura 13 - Caracterização dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> de 12 traços da Classe 1B.....	106
Figura 14 - Comparação da resistência à compressão em relação à pontuação única de 12 traços da Classe 1B.....	108
Figura 15 - Resultado da pontuação única total separada por <i>endpoint</i> com o indicador de intensidade de impacto total de todos os traços da Classe 1B.....	110

Figura 16 - Caracterização dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> de 12 traços da Classe 2.....	112
Figura 17 - Comparação da resistência à compressão em relação à pontuação única de 12 traços da Classe 2.....	115
Figura 18 - Resultado da pontuação única total separada por <i>endpoint</i> com o indicador de intensidade de impacto total de todos os traços da Classe 2.....	116
Figura 19 - Pontuação única total por classe de resistência dividida em <i>midpoints</i> juntamente com suas respectivas Intensidades de Impacto.	118
Figura 20 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 01) 550C-50CR-MK.....	119
Figura 21 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 01) 550C-30CR-MK.....	119
Figura 22 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 11) M6.....	120
Figura 23 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 07) CFL 25-50-25.....	120
Figura 24 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 02) F 30 C 15.....	121
Figura 25 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 02) F 50 C 15.....	121
Figura 26 - Comparação do potencial de Aquecimento Global nos 3 Cenários da análise de sensibilidade.....	125
Figura 27 - Comparação da variação do potencial de Aquecimento Global nos 3 Cenários da análise de sensibilidade.....	126

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Artigos selecionados para análise e suas respectivas adições.....	42
Quadro 2 - Normas das séries ISO 14.040, ISO 14.044 e ISO 13.315.....	47
Quadro 3 - Visão geral de 5 bancos de dados utilizados internacionalmente.....	51
Quadro 4 - Principais metodologias de AICV.....	53
Quadro 5 - Exemplos de Softwares de ACV.....	54
Quadro 6 - Estudos de ACV aplicados na produção de concreto.....	57
Quadro 7 - Artigos selecionados para análise.....	69
Quadro 8 - Quantidade de traços por Classe de resistência.....	69
Quadro 9 – Categorias de impacto do método <i>Impact 2002+</i> e suas unidades.....	75
Quadro 10 - Tipos de cimento utilizados na ACV.....	81
Quadro 11 - Cenário de simulação.....	83
Quadro 12 - Critérios de alocação.....	85
Quadro 13 - Montagem dos materiais no <i>SimaPro</i>	86
Quadro 14 - Consumo de energia na fábrica.....	90
Quadro 15 - Exemplo da montagem do traço (Artigo 07) CFL 55-30-15 no <i>SimaPro</i>	90
Quadro 16 - Resultado dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> e pontuação única total para o consumo médio de cada material.....	92
Quadro 17 - Resultado dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> de 12 traços da Classe 1A.....	97
Quadro 18 - Resultado da resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento de 12 traços da Classe 1A.....	100

Quadro 19 - Resultado dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> de 12 traços da Classe 1B.....	105
Quadro 20 - Resultado da resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento de 12 traços da Classe 1B.....	108
Quadro 21 - Resultado dos 3 principais indicadores de <i>midpoints</i> de 12 traços da Classe 2.....	112
Quadro 22 - Resultado da resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento de 12 traços da Classe 2.....	114
Quadro 23 - Comparação dos <i>endpoints</i> em pontuação única dos melhores e piores traços de cada classe de resistência.....	117
Quadro 24 - Comparação dos indicadores de Intensidade de Impacto dos melhores e piores traços de cada classe de resistência.....	118
Quadro 25 - Potencial de Aquecimento Global nos 3 Cenários da análise de sensibilidade.....	125
Quadro 26 - Diferença de impacto ambiental nos 3 cenários da análise de sensibilidade.....	126
Quadro A1 - Traços do artigo 1 (ISMAIL e HASSAN, 2016).....	153
Quadro A2 - Traços do Artigo 2 (NGUYEN et al., 2016).....	155
Quadro A3 - Traços do Artigo 3 (SADRMOMTAZI et al., 2016).....	155
Quadro A4 - Traços do Artigo 4 (LIU e POON, 2015).....	156
Quadro A5 - Traços do Artigo 5 (GHERNOUTI et al., 2015).....	156
Quadro A6 - Traços do Artigo 6 (ZHAO et al., 2015).....	157
Quadro A7 - Traços do Artigo 7 (CELIK et al., 2015).....	158
Quadro A8 - Traços do Artigo 8 (PEREIRA-DE-OLIVEIRA et. al., 2014).....	158

Quadro A9 - Traços do Artigo 9 (SUA-IAM e MAKUL, 2013).....	158
Quadro A10 - Traços do Artigo 10 (HER YUNG et al., 2013).....	159
Quadro A11 - Traços do Artigo 11 (GESOGLU et al., 2012).....	159
Quadro A12 - Traços do Artigo 12 (ALI e AL-TERSAWY, 2012).....	160
Quadro A13 - Traços do Artigo 13 (LIU, 2011).....	161
Quadro A14 - Traços do Artigo 14 (GRDIC et al., 2010).....	161
Quadro A15 - Traços do Artigo 15 (KOU e POON, 2009).....	161
Quadro B1 - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1A.....	162
Quadro B2 - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1B.....	167
Quadro B3 - Resultados da ACV completa da classe de resistência 2.....	170
Quadro C1 - Ensaio de reologia, propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura realizados nos artigos coletados.....	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa do consumo de constituintes do concreto.....	34
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACV: Avaliação do Ciclo de Vida ou Análise do Ciclo de Vida

AICV: Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAA: Concreto Autoadensável

ELCD: European Life Cycle Database

EPD: Environment Product Declaration

EUA: Estados Unidos da América

GEE: Gases de efeito estufa

ICV: Inventário do Ciclo de Vida

ISO: International Organisation for Standardisation

LCA: Lyfe Cycle Assessment ou Lyfe Cycle Analysis

LCIA: Life Cycle Impact Assessment

LCI: Life Cycle Inventory

MP: Materiais Particulados

CPA: Portland EUA TIPO A

CPB: Cimento Portland EUA TIPO B

CPC: Cimento Portland EUA Tipo C

Ar: Areia

Br: Brita

Ag: Água

SP: Superplastificante

AAE: Agregado Artificial de Escória

BRRP: Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu

CV: Cinzas Volantes

CVLFC: Cinzas Volantes de Leito Fluidizado Circulante

CR: Concreto Reciclado

EGAF: Escória Granulada de Alto Forno

FRSP: Fibra de Resíduo de Saco Plástico

LV: Lama Vermelha do Processo Bayer

MC: Metacaulim

PC: Pó de Calcário

RA: Resíduo de Alumina

RPET: Resíduo de Polietileno Tereftalato

SA: Sílica Ativa

VR: Vidro Reciclado

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c: Relação água/cimento

CH₄: Metano

CO₂: Gás carbônico

F_{ck}: Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias

H₂O: Água

NO_x: Óxidos de Nitrogênio

NO₂: Dióxido de Nitrogênio

Pt: Point ou Ponto - pontos por unidade de emissão, sendo que um ponto (Pt) representa o impacto médio, de uma categoria de impacto específica, que foi causado por uma pessoa na Europa durante um ano

SO_x: Óxidos de enxofre

SO₂: Dióxido de enxofre

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA.....	22
1.2. OBJETIVO.....	27
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	27
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1. O CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA): CARACTERÍSTICAS GERAIS E O CICLO DE VIDA.....	30
2.1.1. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES.....	30
2.1.2. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO E A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS.....	33
2.1.2.1. CIMENTO.....	35
2.1.2.2. ÁGUA.....	36
2.1.2.3. AGREGADOS.....	36
2.1.2.4. ADITIVOS QUÍMICOS.....	38
2.1.2.4.1. SUPERPLASTIFICANTES.....	38
2.1.2.4.2. ADITIVOS MODIFICADORES DE VISCOSIDADE.....	39
2.1.2.5. ADIÇÕES MINERAIS E A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS.....	40
2.1.3. CICLO DE VIDA DO CAA.....	43

2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV): ABORDAGEM CONCEITUAL E MÉTODOLÓGICA.....	45
2.2.1. NORMATIZAÇÃO DO MÉTODO DE ACV.....	45
2.2.2. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	47
2.2.2.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO.....	49
2.2.2.2. CRIAÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV).....	49
2.2.2.3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV).....	51
2.2.2.4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	54
2.2.3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS DA ACV.....	54
2.2.4. REVISÃO DE LITERATURA DA ACV APLICADO NA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE CONCRETOS.....	55
2.3. CONCLUSÕES ACERCA DA REVISÃO DE LITERATURA.....	64
3. METODOLOGIA DA PESQUISA: MÉTODOS, PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS.....	68
3.1. CRITÉRIOS PARA COLETA DOS TRAÇOS ANALISADOS, DIVISÃO POR CLASSE DE RESISTÊNCIA E ESCOLHA DO CENÁRIO PARA SIMULAÇÃO DA ACV.....	68
3.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL E BANCO DE DADOS.....	70
3.3. MÉTODO DE ANÁLISE DE IMPACTO <i>IMPACT 2002+</i>	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES: APLICAÇÃO DAS FASES I, II E III DA ACV.....	78
4.1. FASE I: DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO.....	78
4.1.1. OBJETIVOS, UNIDADE FUNCIONAL E LIMITES DO SISTEMA.....	79
4.1.2. CENÁRIO PARA SIMULAÇÃO.....	81
4.2. FASE II: ANÁLISE DE INVENTÁRIO (ICV).....	84

4.2.1. ALOCAÇÃO DOS MATERIAIS E MONTAGEM DOS TRAÇOS NO SIMAPRO.....	85
4.3. FASE III: AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV).....	90
4.3.1. MATERIAIS, ENERGIA E TRANSPORTE.....	92
4.3.2. CLASSE 1A.....	97
4.3.3. CLASSE 1B.....	104
4.3.4. CLASSE 2.....	111
4.3.5. COMPARAÇÃO ENTRE CLASSES DE RESISTÊNCIA.....	117
4.3.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	124
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS: FASE IV DA ACV.....	129
5.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	129
5.2. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	132
5.3. INDICAÇÃO DE NOVAS TENDÊNCIAS DE ESTUDOS PARA ACV EM CAA.....	134
REFERÊNCIAS.....	137
APÊNDICE A.....	153
APÊNDICE B.....	162
APÊNDICE C.....	173

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A melhoria dos indicadores do desenvolvimento sustentável vem chamando a atenção da indústria da construção civil, pois esse setor é responsável pelo alto consumo energético e vários danos ao meio ambiente relacionados principalmente com o consumo de matérias-primas, acumulação ou deposição inadequada de resíduos e gases de efeito estufa (FEIZ *et al.*, 2014; ZIMMERMANN *et al.*, 2005). As atividades envolvidas nos processos de construção são as principais causadoras do esgotamento das reservas naturais, sendo responsável por 24% das extrações de recursos naturais em uma escala mundial, e também são as maiores geradoras de resíduos (BRIBÍAN *et al.*, 2010). Além do esgotamento de recursos naturais, a extração de matérias-primas para alimentar a indústria da construção civil acarreta outros impactos ambientais que devem ser tratados de forma criteriosa, tais como, os danos às paisagens, degradação dos ecossistemas, danos à saúde humana e a contaminação do solo, da água e do ar pelas emissões provenientes da produção e manipulação dos materiais de construção (BLANKENDAAL *et al.*, 2014)

É de conhecimento científico que o maior responsável pelas emissões de gases do efeito estufa é o setor da construção civil, responsável por cerca de 40-50% das emissões de gases de efeito estufa no mundo (MONKIZKHASREEN *et al.*, 2009). Gases poluentes e danosos ao meio ambiente são lançados para a atmosfera durante todo o processo de construção, incluindo o transporte dos materiais, o gasto de energia das máquinas usadas no processo e a fabricação de materiais de construção, sendo o último responsável por cerca de 86% de toda emissão (YAN *et al.*, 2010). Além disso, os resíduos gerados durante a construção ou demolição constituem uma parte representativa do total de lixo gerado nas cidades.

Na União Europeia, o ciclo de vida dos edifícios, incluindo a construção, operação e demolição, consome cerca de 50% da demanda total de energia e contribui com quase 50% das emissões de todo o CO₂ liberado na atmosfera (DIMOUNDI e TOMPA, 2008). Na China, os impactos ambientais cumulativos de processos de construção têm aumentado devido ao grande número de projetos de construção em andamento a cada ano, tornando-se um problema grave que pode causar danos significativos não

somente para os ecossistemas, mas também para a saúde humana e o bem-estar da população (LI *et al.*, 2010). Os autores citam o exemplo que, para melhorar a qualidade do ar de Pequim durante os jogos olímpicos de 2008, o comitê de organização precisou impor uma proibição de atividades de construção antes e durante as olimpíadas para minimizar a poeira de construção e controlar a qualidade do ar.

Por outro lado, as relações intersetoriais da construção civil influenciam praticamente todas as outras áreas econômicas, proporcionando emprego e renda a um grande número de trabalhadores, qualificados e não qualificados, podendo assim ser denominado como um agente desenvolvimentista da economia. Entretanto, ainda existem discrepâncias entre a forma ideal de desenvolvimento econômico sustentável e os processos de construção existentes (LAM *et al.*, 2011).

O termo desenvolvimento sustentável é definido como a melhoria da qualidade de vida que concede às pessoas a oportunidade de viver em um ambiente saudável e com melhores condições sociais, econômicas e ambientais para as gerações presentes e futuras (ORTIZ *et al.* 2009). Um dos desafios crucial da sustentabilidade para as próximas décadas é melhorar a gestão dos recursos naturais, a fim de reduzir os atuais níveis de pressões ambientais antrópicas (VALIPOUR *et al.*, 2014). Dessa forma, como proposta de solução para as ameaças ao meio ambiente provenientes da cadeia que envolve a construção civil, estudos afirmam que é necessário analisar os materiais de construção separadamente, com foco no aperfeiçoamento da utilização de materiais recicláveis, além de estudar alternativas de transporte e a adoção de tecnologias de construção de baixo consumo energético (YAN *et al.*, 2010). Assim, seguindo uma tendência, esta pesquisa realizará um estudo de caráter ambiental e sustentável dentro da indústria da construção civil, voltando suas atenções para a cadeia produtiva do concreto.

O concreto é um componente-chave na construção de edifícios decorrente de suas múltiplas vantagens, incluindo seu preço baixo, propriedades mecânicas e de durabilidade adequadas, capacidade de armazenamento de calor, inércia química e facilidade de ser formado em diversas formas e tamanhos (VALIPOUR *et al.*, 2014).

Nesta pesquisa, o foco será direcionado ao Concreto Autoadensável (CAA), pois ele oferece várias vantagens no processo de construção, relacionadas à melhor qualidade, alta produtividade e condições de trabalho. Além disso, quando comparado com o concreto convencional, geralmente exibe uma melhor durabilidade potencial (PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.*, 2014). Os CAAs estão sendo cada vez mais utilizados para a construção de elementos de concreto complexos altamente reforçados e para estruturas de concreto maciço, como barragens, fundações com grande espessura, edifícios altos, pontes, túneis e estruturas *off-shore* (CELIK *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2015).

No final de 1980, o CAA foi introduzido pela primeira vez na indústria da construção japonesa e se tornou amplamente utilizado em escala mundial nos últimos anos. Isso porque é um tipo especial de concreto de alto desempenho, com excelentes propriedades reológicas, podendo se espalhar por uma longa distância sob seu próprio peso, bem como preencher as formas congestionadas com reforço estrutural e áreas de difícil acesso sem a necessidade de vibrações internas ou externas (ZHAO *et al.*, 2015). O uso do CAA não só pode reduzir o período de construção e custo do trabalho, mas também proporciona um melhor ambiente de trabalho, eliminando vibração e ruídos na obra (BROUWERS e RADIX, 2005).

Entretanto, para garantir a competitividade futura dos vários tipos de concreto como material de construção, é essencial melhorar a sua sustentabilidade com foco na produção de matérias-primas sustentáveis e novas tecnologias de fabricação com baixo impacto ambiental (PROSKE *et al.*, 2013).

O concreto é o material de construção mais utilizado em infraestruturas e, em média, cerca de uma tonelada é produzida a cada ano para cada ser humano no mundo. Assim, devido a essa ampla utilização global é fundamental avaliar os impactos ambientais desse material corretamente, levando em consideração as emissões de gases de efeito estufa geradas e as alterações climáticas produzidas (VAN DEN e DE BELIE, 2012).

Na avaliação dos impactos ambientais dos processos de produção do concreto é relevante focar em todo seu ciclo de vida, abrangendo limites além do projeto. Todo o processo produtivo, no que concerne ao seu ciclo de vida, desde a extração das

reservas de materiais até à deposição final de resíduos, é importante do ponto de vista sustentável (REBITZER *et al.*, 2004). Também deve ser dada atenção aos estudos de viabilidade ambiental na substituição de partes do cimento por materiais alternativos e de seus agregados naturais por resíduos reciclados, de modo a tornar o material cada vez menos nocivo ao meio ambiente, e sempre cuidar para que o desempenho técnico não seja prejudicado (VAN DEN e DE BELIE, 2012; MARINKOVIC *et al.*, 2010). A utilização de resíduos e subprodutos industriais na composição do concreto aumenta seu valor ecológico e, em parte, resolve questões de locais de disposição de resíduos, logo, a sustentabilidade é uma imperativa da engenharia civil contemporânea (PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.*, 2014; GRDIC *et al.*, 2010). Vale ressaltar que a utilização de um resíduo reciclado não é associada com qualquer impacto ambiental quando este é inserido em um novo sistema produtivo (CLEARY, 2010; GENTIL *et al.*, 2011; LANER e RECHBERGER, 2009).

É imperativo um diagnóstico detalhado das condições de extração de matérias-primas, produção, distribuição, utilização e disposição final existentes em um processo produtivo que auxiliem na elaboração de estratégias que possibilitem a minimização de custos e otimização do fluxo de materiais e energia no sistema analisado (GENTIL *et al.*, 2011). Nesse contexto, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma metodologia capaz de oferecer suporte ferramental em projetos para avaliar os impactos ambientais de produtos e processos durante todo seu ciclo de vida, apresentando resultados claros e com base científica, além de demonstrar ser uma valiosa ferramenta para o estudo da viabilidade ambiental da incorporação de resíduos reciclados e subprodutos industriais na produção de concreto (MARINKOVIC *et al.*, 2010; TAKANO *et al.*, 2014; GENTIL *et al.*, 2010; BJÖRKLUND e FINNVEDEN, 2007; BUYLE *et al.*, 2013).

Nascida no início dos anos 60, da preocupação de racionalizar o consumo energético dos edifícios, a ACV logo evoluiu para um conceito mais abrangente e que integra todos os impactos ambientais, tornando-se uma das principais ferramentas utilizadas na prevenção da poluição (REBITZER *et al.*, 2004). O conceito de ciclo de vida é essencial para a sustentabilidade, visto que incorpora vários aspectos que permitem uma análise objetiva dos processos ou serviços (STANISKIS e VARZINSKAS, 2010). Dessa forma, a ACV é uma metodologia utilizada para avaliar impactos ambientais

em todas as fases do ciclo de vida, desde a origem das matérias-primas até ao fim da vida útil e eliminação de resíduos, tratando-se de uma metodologia global e robusta, que não é específica de uma área (ORTIZ *et al.*, 2009; GENTIL *et al.*, 2011; GENTIL *et al.*, 2010).

A descrição da metodologia de ACV baseia-se nas normas internacionais da série ISO 14.040 (2006) e ISO 14.044 (2006) sendo um dos métodos de avaliação de impactos ambientais mais utilizado e detalhado na literatura recente em comparação com outras ferramentas de avaliação ambiental (CHAU e LEUNG, 2015; NIERO *et al.*, 2015). Países como o Reino Unido, Holanda, França, Dinamarca, Noruega, Suécia e Finlândia, que estão mais avançados nas pesquisas de desenvolvimento sustentável, têm concentrado esforços nos estudos de ACV para os materiais de construção, integrando a componente ambiental em conjunto com outras ferramentas, como o caso dos Sistemas de Gestão Ambiental (FINNVEDEN *et al.*, 2005; MOBERG *et al.*, 2005).

A metodologia ACV é reconhecida como uma ferramenta inovadora que melhora a sustentabilidade na indústria da construção civil e de materiais em todas as fases do ciclo de vida e, para garantir que variedade de fatores ambientais sejam identificados, é necessário quebrar o processo de construção sistematicamente em processos unitários pequenos, permitindo a aplicação da metodologia (LI *et al.*, 2010; ORTIZ *et al.*, 2009; BRIBIÁN *et al.*, 2009; REZA *et al.*, 2014).

Dessa forma, esta dissertação consiste em associar a produção de CAA com a incorporação de resíduos e subprodutos industriais (ECO-CAA, CAA Verde ou CAA Ecológico) com o conceito de ciclo de vida utilizando a metodologia de ACV para fazer comparações em um cenário específico. Para isso, este estudo utilizou traços de CAAs potencialmente ecológicos com desempenho técnico já comprovado em artigos científicos em que o desempenho ambiental não foi analisado.

Nota-se, assim, que com os novos paradigmas ambientais, a ACV é uma ferramenta capaz de integrar o desempenho técnico ao desempenho ambiental nos estudos de viabilidade da incorporação de resíduos e subprodutos industriais nos diversos tipos de concretos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta dissertação consiste em associar a produção de CAA com a incorporação de resíduos e subprodutos industriais (ECO-CAA, CAA Verde ou CAA Ecológico) com o conceito de ciclo de vida, utilizando a metodologia de ACV para fazer comparações em um cenário específico.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos da pesquisa estão relacionados:

- Revisão bibliográfica sobre o processo de produção dos CAAs com incorporação de resíduos e subprodutos industriais, os tipos de resíduos utilizados e seus traços;
- Revisão bibliográfica sobre ACV contemplando os aspectos conceituais, metodológicos e as ferramentas computacionais utilizadas;
- Escolha e adaptação de um cenário para simulação do ciclo de vida dos traços de CAAs;
- Caracterização, quantitativa e qualitativa, dos impactos ambientais nos estágios do ciclo de produção dos CAAs selecionados, utilizando o Software *SimaPro*, método de análise de impacto denominado *Impact 2002+* e o banco de dados *Ecoinvent 3.2*;
- Ranqueamento dos traços de CAAs selecionados do melhor desempenho ambiental para o pior, divididos por classes de resistência;
- Caracterização dos materiais, resíduos, subprodutos industriais, gastos energéticos e modais de transporte que compõem o processo produtivo dos CAAs selecionados no cenário proposto;
- Identificação dos processos mais relevantes para a caracterização do desempenho ambiental dos CAAs selecionados;
- Identificação dos resíduos e subprodutos industriais que melhoram e que pioram o desempenho ambiental dos CAAs selecionados;
- Realização de uma análise de sensibilidade dos dados de inventário da ACV;

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices e anexos. A seguir apresenta-se uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 1 é introdutório e nele foram abordados as justificativas e a importância da ACV na escolha de materiais alternativos para fabricação de CAAs com alto desempenho ambiental. Também são apresentados o objetivo geral e os específicos da pesquisa, além da estrutura do trabalho.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica se apoia em dois pilares. O primeiro pilar refere-se aos estudos que caracterizam de forma geral o CAA, abordando suas propriedades, composição do traço e seu ciclo de vida. O segundo pilar contém abordagens conceituais e metodológicas da ACV, abordando a normatização do método, fases de aplicação, ferramentas e aplicação na indústria de fabricação do concreto.

O capítulo 3 expõe a metodologia da pesquisa baseada no método de coleta dos 15 artigos e dos 162 traços de CAA analisados, a escolha e a adaptação do cenário para simulação, a seleção do banco de dados de apoio, a coleta dos dados complementares, o método de análise de impacto escolhido e a ferramenta computacional de apoio.

No capítulo 4 são apresentadas a aplicação da fase I, II e III da ACV, enfatizando a definição do objetivo e escopo, análise do inventário e avaliação dos impactos do ciclo de vida dividido em 3 classes de resistência, bem como uma análise de sensibilidade para testar a influência dos dados de entrada nos resultados.

No capítulo 5 estão descritas as principais conclusões obtidas na fase III da ACV com observações, resultados e análises feitas ao longo deste estudo. Além de algumas sugestões para trabalhos futuros de pesquisa nessa área a partir das lacunas encontradas durante esta pesquisa.

Por fim, são relacionadas as referências normativas e bibliográficas que contribuíram para a elaboração deste trabalho. Ao final do volume são apresentados os apêndices pertinentes a este trabalho.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“A principal meta da educação é criar homens que sejam capazes de fazer coisas novas, não simplesmente repetir o que outras gerações já fizeram. Homens que sejam criadores, inventores, descobridores. A segunda meta da educação é formar mentes que estejam em condições de criticar, verificar e não aceitar tudo que a elas se propõe.”

Jean Piaget

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo anterior foi descrita uma breve contextualização do tema central da dissertação, a justificativa e a importância do tema estudado, e os objetivos gerais e específicos da pesquisa, para uma compreensão inicial do tema. Também consta a estrutura do trabalho, buscando melhorar a compreensão da pesquisa.

Neste capítulo será apresentada uma revisão de literatura das teorias que contribuem para o entendimento da problemática central da dissertação. Entre as teorias revisadas encontram-se os estudos das principais características e da propriedade dos CAAs, bem como um breve comentário sobre seu ciclo de vida, além do estado da arte sobre a metodologia de ACV e da aplicação desta na indústria do concreto que norteou o delineamento deste estudo.

2.1. O CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA): CARACTERÍSTICAS GERAIS E O CICLO DE VIDA

2.1.1. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

O concreto de Cimento Portland tem sua aplicação nos mais variados tipos de estruturas, desde grandes barragens até sofisticados edifícios. E, comparado aos outros materiais de construção metálicos, cerâmicos e poliméricos, o concreto ocasiona menos despesas, além de apresentar resistência e durabilidade adequadas (BLANKENDAAL *et al.*, 2014).

Sua classificação pode ser feita baseada em critérios de resistência à compressão aos 28 dias, dividindo-se nas seguintes categorias: concreto de baixa resistência com resistência à compressão menor que 20 MPa, concreto de resistência moderada com resistência à compressão de 20 a 50 MPa e o concreto de alta resistência com resistência à compressão superior a 50 MPa (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Um dos grandes passos na evolução da tecnologia do concreto foi o concreto Autoadensável (CAA) que conquistou ampla aceitação nos últimos anos (ALI e ALTERSAWY, 2012). Ele foi criado a partir da demanda por um concreto mais fluido,

para atender elementos altamente armados, mas que, ao mesmo tempo, tivesse boa coesão para evitar a exsudação e segregação, ou seja, um concreto de alta trabalhabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A capacidade de enchimento e estabilidade do CAA no estado fresco pode ser definida por quatro características principais: fluidez, viscosidade (avaliada pela taxa de fluxo), capacidade de passagem e resistência à segregação. Desse modo, a mistura será classificada como um CAA somente se todas as características mencionadas estiverem presentes (GRDIC *et al.*, 2010). Essas propriedades são obtidas pelo emprego de aditivos químicos denominados superplastificantes e adições minerais finas, logo, o CAA depende do tipo e da quantidade de aditivos utilizados (ALI e ALTERSAWY, 2012).

O CAA está sendo cada vez mais utilizado na construção devido a várias vantagens em relação ao concreto convencional (CELIK *et al.*, 2015). Ao se basear na pesquisa de GIACOMETTI (2008), as principais vantagens do concreto autoadensável estão associadas à sua independência do processo de compactação. Devido à grande deformabilidade e à baixa segregação, sua aplicação em estruturas difíceis ou pouco viáveis de serem construídas mediante a vibração é facilitada. Com isso também são eliminados os problemas gerados pela má compactação do concreto, como macro defeitos, bolhas de ar e ferragens expostas, responsáveis diretos pela queda no desempenho mecânico e na durabilidade das estruturas (GETTU e AGULLÓ, 2003; COPPOLA, apud TUTIKIAN, 2004).

A ausência de vibração também conduz a outros benefícios, tais como:

- a) rapidez na execução da obra: com a eliminação da vibração reduz-se o tempo de concretagem, o número de trabalhadores e os equipamentos de vibração envolvidos no processo (CBIC, 2005);
- b) menor dependência de mão de obra qualificada: as operações de lançamento e consolidação do CAA são simplificadas, não sendo necessário muita habilidade ou grande quantidade de operários para se obter um produto final de qualidade (GETTU e AGULLÓ, 2003; MANUEL, 2005);

c) melhor aspecto superficial: desde que sejam utilizadas fôrmas de qualidade e que haja um controle técnico na aplicação, a propriedade auto nivelante do CAA garante superfícies suaves e uniformes, possibilitando sua utilização como concreto aparente em detalhes complexos, como em obras de arte. Além disso, conduz a uma economia em revestimento uma vez que não há necessidade de se corrigir falhas de concretagem (DE LA PEÑA, 2000a; EFNARC, 2002);

d) redução de problemas ergonômicos: a vibração necessária para compactar o concreto convencional provoca problemas de saúde nos trabalhadores, como fadiga, dores lombares e má circulação sanguínea nas mãos (BARTOS e SÖDERLIND, 2000; GETTU e AGULLÓ, 2003; RILEM, 2006);

e) redução do barulho: o ruído provocado pelos vibradores incomoda não só os trabalhadores na obra, mas também a população e os estabelecimentos (escolas, hospitais entre outros) próximos à construção (GETTU e AGULLÓ, 2003). Em um estudo realizado por Bartos e Söderlind (2000), constatou-se que com o uso do concreto autoadensável há uma redução da ordem de um décimo de decibéis no ruído captado pelos trabalhadores e pelo entorno em comparação ao uso do concreto convencional.

Apesar de todas as vantagens técnicas, econômicas e ambientais mencionadas anteriormente, a aplicação do concreto autoadensável no campo da construção civil ainda é modesta. Um dos principais motivos da dificuldade de aceitação é de ordem econômica.

Ho *et al.* (2001b) afirmam que, dependendo dos tipos de materiais empregados na mistura e do grau de controle de qualidade do concreto, o custo do CAA pode ser de 2 a 3 vezes maior do que em um concreto convencional. Esses autores ainda citam que na França o preço do CAA é em torno de 50 a 100% mais caro, e em Singapura, onde todos os ingredientes da mistura são importados, os custos chegam a ser 150% maiores do que no concreto vibrado.

Por outro lado, em uma análise em que se considerem o custo total da construção, como gastos com aluguel e manutenção de equipamentos de vibração, desgaste dos moldes e formas, números de trabalhadores, custos com energia elétrica, entre outros,

o CAA se apresenta com um material economicamente viável (HO *et al.*, 2001b; SCHLGBRAUM, 2002).

Outro aspecto vantajoso do concreto autoadensável é que ele pode incorporar uma grande quantidade de resíduos industriais (cinzas volante e escória de alto-forno, por exemplo) como finos em sua mistura. Além de essas adições diminuírem os gastos com materiais no CAA, melhoram consideravelmente suas propriedades no estado fresco e endurecido, solucionando os problemas ambientais gerados pela disposição desses resíduos (BOSILJOKOV, 2003; GOMES *et al.*, 2003).

No entanto, as misturas típicas de CAA geralmente têm um teor de cimento excessivamente alto, elevado calor de hidratação, e utilizam uma grande quantidade de superplastificantes de alto desempenho e agentes modificadores de viscosidade (CELIK *et al.*, 2015).

Além de ser pouco econômico, a utilização excessiva de cimento é indesejável quando se considera os aspectos ambientais, já que a produção de uma tonelada de cimento gera a emissão de aproximadamente uma tonelada de CO₂ e de outros gases de efeito estufa para a atmosfera (CELIK *et al.*, 2015; GESOGLU e OZBAY, 2007; BOUZOUBAA e LACHEMI, 2001). Ademais, o processo de fabricação do cimento também gera milhões de toneladas de poeira de forno, que se espalham na atmosfera e induzem doenças respiratórias e problemas de saúde (HUNTZINGER e EATMON, 2009). Tudo isso faz com que os pesquisadores analisem a incorporação de adições minerais, tais como cinzas volantes (CV), sílica ativa (SA), escória granulada de alto forno (EGAF), e outros resíduos e subprodutos industriais, pois, ao utilizar esses materiais, não só se reduz o custo, mas também se fornece desempenho adicional para os CAAs (GESOGLU e OZBAY, 2007).

2.1.2. COMPOSIÇÃO DO TRAÇO E A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS

O concreto é considerado o material artificial mais consumido do planeta. A expectativa é que a demanda mundial aumente para cerca de 16 bilhões de toneladas (t) por ano até 2050 (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Ao tomar esse valor como base,

pode-se estimar o consumo de constituintes do concreto como visto na tabela 1 (traço por volume 1:2:3, equivalente por massa a 1:2,17:2,94, com relação a/c de 0,61, peso específico do concreto 2,31 t/m³).

Tabela 1 – Estimativa do consumo mundial de constituintes do concreto por ano

Material	Quantidade	Unidade
Cimento	2,38	10 ⁹ t
Areia (1:2,17)	5,17	10 ⁹ t
Brita (1:2,94)	7,00	10 ⁹ t
Água (a/c = 0.61)	1,45	10 ⁹ L
Concreto (total)	16	10 ⁹ t
População mundial	10	10 ⁹ hab.
Consumo per capita de concreto	1,6	t/hab.

Nota: 10⁹ = bilhões

Fonte: Elaborado pelo autor

Os materiais envolvidos na dosagem de concretos autoadensáveis são, em geral, os mesmos empregados no concreto convencional. São eles: cimento, agregados graúdos e miúdos, finos, água e aditivos. No entanto, no caso do CAA, o uso de aditivos superplastificantes é obrigatório e imprescindível para se obter alta fluidez. Além disso, também estão presentes as adições minerais e os agentes modificadores de viscosidade, utilizados para se obter uma adequada coesão na mistura e evitar a segregação e a exsudação durante a colocação do concreto (GETTU e AGULLÓ, 2003; LISBÔA *et al.*, 2004).

A dosagem do concreto mais conhecida como traço é o conjunto de procedimentos e decisões que permitem estabelecer as proporções relativas ou as quantidades dos materiais que constituem o concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Do ponto de vista econômico, o emprego de materiais locais no CAA resulta em um concreto economicamente mais viável devido à redução de custos de transporte e facilidade de obtenção. Além do mais, esse concreto pode incorporar um elevado teor de finos, sendo um potencial consumidor de resíduos industriais. A utilização de adições provenientes de resíduos e subprodutos das indústrias locais não só reduz custos do material e melhora seu desempenho, mas também diminui o impacto ambiental (GETTU e AGULLÓ, 2003; GOMES *et al.*, 2003; LISBÔA *et al.*, 2004).

2.1.2.1. CIMENTO

A parte mais importante do concreto é o cimento que atua como um material de ligação. Em termos gerais, cimento é todo material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de ligar fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto (MEHTA e MONTEIRO, 2008; BLANKENDAAL, 2014). O cimento Portland fabricado hoje é constituído de clínquer, um material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação, a uma temperatura aproximada de 1450°C, de uma mistura de calcário, argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera (MEHTA e MONTEIRO, 2008; BLANKENDAAL, 2014). Ele é altamente consumidor de energia em seu processo de produção, consumindo cerca de 4GJ/t de cimento (1110 kwh/t de cimento) (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 660), bem como responsável por grandes emissões de CO₂, alcançando aproximadamente 0,87t de CO₂ por tonelada de clínquer produzido (WBCSD, 2009 apud CELIK *et al.*, 2015). Por cada tonelada de carbonato de cálcio (CaCO₃) calcinado no forno rotativo para formar o óxido de cálcio (CaO), 440 kg de CO₂ são libertados para a atmosfera e a combustão do combustível necessária para gerar o calor de reação libera o restante das emissões (CELIK *et al.*, 2015).

Embora o impacto ambiental atual da indústria de concreto é de fato considerável, o aumento do uso de materiais cimentícios complementares oferece uma possível redução das emissões globais de CO₂, pois se 50% do consumo de cimento forem substituídos por uma alternativa de baixo carbono, cerca de 1 bilhão de toneladas de CO₂ poderiam deixar de ser emitidas (CELIK *et al.*, 2015). A fim de alcançar tal nível de reduções de CO₂, a indústria deve abarcar uma abordagem global e integrada que envolva necessariamente o uso de menos concreto em novas estruturas, o consumo de menos de cimento e uso de menos clínquer para fazer cimentos (MEHTA, 2009).

Além disso, algumas características do aglomerante devem ser avaliadas antes de ser incorporado ao CAA, entre elas a finura e a capacidade de adsorver o superplastificante. Em concretos autoadensáveis é desejável cimentos que apresentem maior área específica, objetivando a redução da tensão de escoamento e maior viscosidade (NEVILLE, 1997). Esse tipo de cimento também é o mais adequado para produzir CADAR (Concreto Autoadensável de Alta Resistência), pois

possuem elevada velocidade de hidratação e um rápido ganho de resistência (NUNES, 2001; REPETTE, 2005).

O fenômeno da adsorção do aditivo pelo cimento ocorre preferencialmente nas fases de aluminatos (C_3A e C_4AF), especialmente no C_3A . A fixação no aluminato tricálcico desenrola-se de forma rápida e em poucos segundos, retardando a evolução da hidratação. Os aditivos também podem retardar a hidratação dos silicatos (C_2S e C_3S), no entanto, esse efeito é mais evidente no C_3A . Por isso são recomendados cimentos com uma quantidade menor do que 10% (em massa de cimento) do composto, a fim de manter a trabalhabilidade das misturas de CAA (EFNARC, 2002; JOLICOEUR e SIMARD, 1998; REPETTE, 2005).

2.1.2.2. ÁGUA

Outro ponto de destaque no preparo do concreto é o cuidado que se deve ter com a qualidade e a quantidade da água utilizada, pois ela é a responsável por ativar a reação química que transforma o cimento em uma pasta aglomerante. Assim, se a quantidade for muito pequena, a reação não ocorrerá por completo, e se for superior à ideal, a resistência diminuirá em função dos poros que ocorrerão quando o excesso evaporar (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A hidratação do cimento consiste na transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Dessa forma, os elementos químicos, juntamente com a água, rearranjam-se em novos sistemas cristalinos, conferindo rigidez à mistura, que é a principal propriedade reológica esperada do produto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Nesse processo de hidratação, o sulfato de cálcio presente na composição do cimento age como retardador de pega, evitando-se o enrijecimento imediato da pasta causado pela reação do C_3A com a água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.1.2.3. AGREGADOS

Os agregados são materiais granulares sem forma e volume definidos, geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em construções (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Considerando-se que os agregados são interligados em um todo monolítico por meio da pasta de cimento, eles conferem características técnicas

extremamente vantajosas ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e maior durabilidade em relação à pasta de cimento pura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Pode-se classificar a obtenção dos agregados como sendo naturais e artificiais. Os agregados naturais, geralmente os mais utilizados, são derivados de areia, cascalho e britas, sendo preferível o emprego de agregados naturais, por apresentarem grãos com forma mais uniforme e arredondada (EFNARC, 2002; REPETTE, 2005; SCCEPG, 2005). Os agregados artificiais são geralmente derivados de resíduos e rejeitos sólidos de atividades industriais (BRITO e DA SILVA, 2014). Vale ressaltar que, em regiões com pouca areia, cascalho ou brita, vários tipos de resíduos reciclados de construção, que não reagem com cal, podem ser utilizados como material agregado inclusive o concreto reciclado, caso seja triturado e fique do tamanho normal de um agregado (BLANKENDAAL, 2014; RAHAL, 2007).

O termo agregado graúdo é usado para descrever um agregado maior do que 4,8 mm e o termo agregado miúdo é usado para descrever agregados menores do que 4,8 mm (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Eles têm uma influência significativa sobre as propriedades reológicas e mecânicas do concreto, pois sua massa específica, a distribuição de tamanho de partículas, a forma e textura da superfície influenciam as propriedades do concreto no estado fresco (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A influência dos agregados miúdos nas propriedades dos concretos em geral é significativamente maior do que a dos agregados graúdos. Em especial no CAA, a umidade superficial das areias deve ser cuidadosamente verificada, pois esse concreto é muito mais sensível às flutuações no teor de água total da mistura do que o concreto tradicional (RILEM, 2006).

O agregado graúdo geralmente tem seu tamanho máximo limitado entre 12 e 20 mm, sendo que o espaçamento entre as barras da armadura é o principal fator dessa limitação. Mas valores inferiores ou superiores são aceitáveis, dependendo das exigências da estrutura. Gomes (2002), por exemplo, fixou a dimensão máxima do agregado graúdo em 12 mm, visando à produção de concretos autoadensáveis de alta resistência. Da mesma maneira, em certas situações é possível o emprego de

agregados com dimensão máxima característica entre 25 e 40 mm (EFNARC, 2002; GOMES, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003; SCCEPG, 2005).

2.1.2.4. ADITIVOS QUÍMICOS

Em situações específicas na utilização do concreto é necessário utilizar aditivos, que são substâncias adicionadas intencionalmente durante o processo de mistura, em uma quantidade não superior aos 5% sobre a massa do cimento. A finalidade é reforçar ou melhorar certas características, inclusive facilitando seu preparo e utilização, de modo a modificar as propriedades da mistura no estado fresco ou no estado endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para o CAA, faz-se praticamente imprescindível o uso de superplastificante, produto que visa proporcionar uma maior fluidez ao concreto sem reduzir significativamente sua viscosidade. Os mais utilizados para a produção de concreto autoadensáveis são os de terceira geração, à base de policarboxilatos. Em alguns casos faz-se uso também de aditivos modificadores de viscosidade para auxiliar na redução da segregação. Outros tipos de aditivos utilizados no CAA são os incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Em alguns casos também são utilizados aditivos modificadores de viscosidade para ajudar a reduzir a segregação e a sensibilidade da mistura, devido às variações de outros componentes, principalmente do teor de umidade (SCCEPG, 2005).

Outros aditivos que incluem incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega podem ser usados da mesma forma que no concreto convencional. No entanto, deve-se verificar a compatibilidade dos outros aditivos adicionados ao CAA e com o cimento a ser utilizado (SCCEPG, 2005).

A seguir são apresentadas as características dos principais tipos de aditivos utilizados no concreto autoadensável.

2.1.2.4.1. SUPERPLASTIFICANTES

Os superplastificantes são aditivos químicos incorporados ao concreto, capazes de atuar na redução da relação água/cimento sem alterar a trabalhabilidade da mistura ou como agente fluidificante, melhorando a fluidez sem necessidade de água

adicional. Por essas características são também chamados de redutores de água de alta eficiência. (RONCERO, 2000; GREISSER, 2002; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Existem três grandes grupos de superplastificantes: os condensados de lignossulfonados modificados, ácidos hidro-carboxílicos e polímeros hidroxilatos, também conhecidos como aditivos de primeira geração; os condensados sulfonados de melamina-formaldeídos, condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos e os poliacrilatos, ou aditivos de segunda geração; e os ésteres de ácido sulfônico, base policarboxilato, ou de terceira geração (AİTCIN, 2000; RAMACHANDRAN, apud GREISSER, 2002).

Para a produção do CAA, os de base policarboxilatos são os mais empregados por conferir considerável aumento na fluidez. Além do mais, permitem a redução de até 40% no teor de água, possibilitando o emprego de concretos de elevada resistência, trabalhabilidade e durabilidade (COLLEPARDI, 1998; AİTCIN, 2000; COLLEPARDI, 2003; REPETTE, 2005).

2.1.2.4.2. ADITIVOS MODIFICADORES DE VISCOSIDADE

Aditivos que modificam a coesão do concreto, sem alterar significativamente a sua fluidez, são chamados modificadores viscosidade (AMV). Esses aditivos são utilizados em CAA para minimizar o efeito das variações de umidade, dos finos nas areias ou da granulometria das partículas, o que o torna menos sensível às pequenas variações nas proporções e condições de outros componentes (SSCEPG, 2005).

Do ponto de vista reológico, esses agentes melhoram substancialmente a coesão do CAA, induzem uma viscosidade moderadamente alta juntamente com um comportamento pseudoplástico. Além disso, em conjunto com os aditivos superplastificantes de última geração, permitem obter concretos estáveis, limitando a perda de água pela exsudação, e minimizando sua tendência à segregação (KHAYAT, 1998; GETTU e AGULLÓ, 2003; SSCEPG, 2005).

São relativamente novos e sua aplicação inicial está intimamente ligada à concretagem submersa (KHAYAT, 1998). A maioria dos AMV são produtos à base de polissacarídeos, cujas cadeias poliméricas adsorvem água e se entrelaçam, formando grandes reticulados flexíveis, responsáveis pelo aumento da retenção da água.

Produtos à base de sílica precipitada também podem ser empregados na composição de aditivos promotores de viscosidade (REPETTE, 2005).

O uso dos agentes modificadores de viscosidade pode ser muito eficaz na estabilização da reologia do CAA. Entretanto, eles não devem ser considerados como uma maneira de evitar a necessidade de uma boa dosagem e seleção cuidadosa dos outros constituintes do concreto, mas sim como uma alternativa valiosa para suprir a necessidade de finos e de correção da mistura (SSCEPG, 2005; REPETTE, 2005). Lachemi *et al.*, (2003); Repette (2005) salientam também que, sendo possível contar com teores adequados de finos, o uso do AMV é dispensável, pois os aditivos disponíveis no mercado são caros, onerando o custo final do concreto.

Outro aspecto importante é que grandes teores de cimento e altas temperaturas podem comprometer negativamente a eficiência dos AMV, assim como elevados teores de finos com módulo de finura inferior a 2,6, podem comprometer o bombeamento devido à alta coesão da mistura. Recomenda-se que a incorporação de AMV não modifique substancialmente as propriedades do concreto fresco que não estão relacionadas com o autoadensamento, como tempo de pega e a quantidade de ar incorporado (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

2.1.2.5. ADIÇÕES MINERAIS E A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS

As adições minerais referem-se a qualquer material além de água, agregados e cimento que é utilizado como componentes da mistura de concreto imediatamente antes ou durante a mistura para substituir parcialmente o cimento ou os agregados de origem natural devido às suas propriedades semelhantes (BEHERA *et al.*, 2014; MULLER *et al.*, 2014). As adições minerais são materiais insolúveis finamente moídos, que podem ser de fonte natural ou, como ocorre em sua maioria atualmente, são resíduos ou subprodutos de outras indústrias. Para substituir partes do cimento as adições minerais mais utilizadas podem ser classificadas como cimentantes e pozolanas. Entre as quais podem-se citar a escória granulada de alto forno, as cinzas volantes, o metacaulim, as cinzas de casca de arroz e outros que estão sendo pesquisados (NEHDI, 2014; CREE *et al.*, 2013). Para substituir partes dos agregados

podem ser utilizados os *fillers* naturais, como calcário, pó de quartzo e resíduos de rochas (MATIAS *et. al.*, 2013).

São classificadas de acordo com sua ação no concreto, conforme os tipos a seguir:

- Inertes (TIPO I) – não possuem atividade química. Seu efeito no concreto é apenas físico, contribuindo com o empacotamento granulométrico (efeito microfíler), no refinamento da estrutura dos poros e na nucleação para os produtos da hidratação do cimento, além de alterar a microestrutura da zona de transição. São comumente chamados de fíler. Os mais utilizados em concreto são o fíler calcário, o pó de pedra e o pó de quartzo (EFNARC, 2002; DAL MOLIN, 2005).
- Reativas (TIPO II) – possuem capacidade de reação com o hidróxido de cálcio $\text{Ca(OH}_2\text{)}$, produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C – S – H), principal fonte de resistência do concreto. As adições reativas subdividem-se em pozolânicas, que incluem a sílica ativa e a cinza volante com baixo teor de cálcio; cimentantes, como a escória granulada de alto forno; e em pozolânicas e cimentantes, simultaneamente, como é o caso da cinza volante com alto teor de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 2008; DAL MOLIN, 2005).

As adições minerais, além de proporcionar um destino mais favorável ambientalmente aos resíduos, também geram numerosos benefícios à produção de concreto, como redução de custo, ganho de trabalhabilidade, aumento da resistência do concreto à fissuração térmica, ao ataque por sulfato e redução da expansão causada pela reação álcali-agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Tanto as adições reativas quanto as inertes podem ser utilizadas na produção de concreto autoadensável, com as importantes funções de suprir a maior necessidade de finos desse concreto, contribuindo, assim, com o aumento da coesão da mistura e evitando a segregação dos agregados e a exsudação da água (EFNARC, 2002; GETTU e AGULLÓ, 2003).

Em relação ao ciclo de vida do concreto, as adições minerais na forma de incorporação de resíduos e subprodutos industriais possuem um impacto substancialmente menor do que os materiais tradicionais, pois preservam as reservas naturais, reduzem o desmatamento, minimizam a emissão de particulados e reduzem

as emissões de gases de efeito estufa causados pela produção do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008; MEHTA, 2009).

No contexto deste estudo, as adições minerais apresentam fundamental importância para sustentabilidade e a melhoria do ciclo de vida do concreto, pois na condição de substitutos parciais do cimento Portland e dos agregados, esses materiais proporcionam uma economia considerável de energia e custos, além não serem descartados na natureza, deixando de gerar mais problemas ambientais (MEHTA e MONTEIRO, 2008; MEHTA, 2009; BEHERA *et. al.*, 2014; MULLER *et. al.*, 2014).

Diversos trabalhos têm descrito a incorporação bem sucedida de resíduos e subprodutos industriais nos traços de CAAs. Nesta dissertação serão abordados 15 estudos, possíveis de serem aplicados no cenário escolhido, publicados no período compreendido entre os anos de 2009 até 2016, conforme consta no quadro 1.

Quadro 1 - Artigos selecionados para análise e suas respectivas adições

ARTIGO	ADIÇÕES, RESÍDUOS E SUBPRODUTOS UTILIZADOS ABORDADOS NO ARTIGO
ISMAIL e HASSAN (2016)	Metacaulim (MC), Escória Granulada de Alto forno (EGAF), Cinzas volantes (CV) e Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP)
NGUYEN <i>et. al.</i> (2016)	Escória Granulada de Alto forno (EGAF), Cinzas volantes (CV) e Cinzas Volantes de leite Fluidizado Circulante (CVLFC)
SADRMOMTAZI <i>et. al.</i> (2016)	Sílica Ativa (SA), Cinzas Volantes (CV) e Resíduo de Polietileno Tereftalato (RPET)
LIU e POON (2015)	Lama Vermelha (LV) e Cinzas Volantes (CV)
GHERNOUTI <i>et. al.</i> (2015)	Fibra de Resíduo de Saco Plástico (FRSP) e Pó de Calcário
ZHAO <i>et. al.</i> (2015)	Escória Granulada de Alto forno (EGAF) e Cinzas volantes (CV)
CELIK <i>et. al.</i> (2015)	Cinzas volantes (CV) e Pó de Calcário (PC)
PEREIRA-DE-OLIVEIRA <i>et. al.</i> (2014)	Concreto Reciclado (CR) e Pó de Calcário (PC)
SUA-IAM e MAKUL (2014)	Resíduo de Alumina (RA)
HER YUNG <i>et. al.</i> (2013)	Escória Granulada de Alto forno (EGAF), Cinzas volantes (CV) e Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP)

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 1 (continuação) - Artigos selecionados para análise e suas respectivas adições

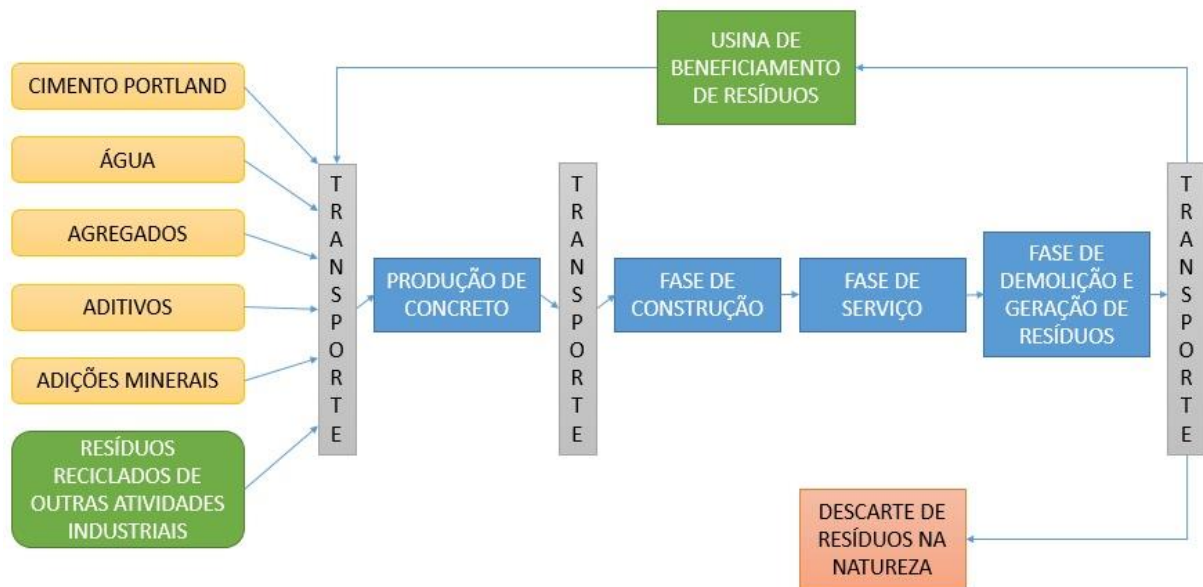
ARTIGO	ADIÇÕES, RESÍDUOS E SUBPRODUTOS UTILIZADOS ABORDADOS NO ARTIGO
GESOGLU <i>et. al.</i> (2012)	Agregado Artificial de Escória (AAE) e Cinzas Volantes (CV)
ALI e AL-TERSAWY (2012)	Vidro Reciclado (VR) e Sílica Ativa (SA)
LIU (2011)	Vidro Reciclado (VR)
GRDIC <i>et. al.</i> (2010)	Concreto Reciclado (CR) e Pó de Calcário (PC)
KOU e POON (2009)	Cinzas volantes (CV) e Vidro reciclado (VR)

Fonte: Elaborado pelo autor

2.1.3. CICLO DE VIDA DO CAA

A Figura 1 ilustra o Ciclo de Vida do CAA com as etapas que compõem a sua cadeia produtiva. Inicialmente, os materiais que originalmente compõe a sua mistura (cimento, água, agregados, aditivos, adições e resíduos) são transportados para uma usina de produção de concreto (fase de produção), na qual são misturados e novamente transportados em caminhões betoneiras para os canteiros de obras (fase de construção). Após serem moldados e passarem pelo processo de cura inicia-se a sua utilização (fase de serviço). Anos depois, quando o material já sofreu fadiga com a ação do tempo ou não é mais necessário utilizá-lo, pode-se executar sua demolição (fase de demolição), o que gera uma grande quantidade de resíduos. Os resíduos gerados posteriormente são descartados, porém eles apresentam um grande potencial de reciclagem, podendo ser beneficiados e retornar para o início do ciclo de vida de um novo concreto.

Figura 1 - Ciclo de vida do Concreto



Fonte: Elaborado pelo autor

Existem vários estudos acerca do ciclo de vida do concreto com o objetivo de tornar o material cada vez mais sustentável levando em consideração a sua importância socioeconômica mundial. Ao observar a Figura 1, é possível citar vários pontos que estão sendo pesquisados no ciclo de vida do concreto para torná-lo mais sustentável. Na mistura do concreto as pesquisas giram em torno da criação de alternativas para diminuir a quantidade de cimento Portland e agregados naturais por mais adições minerais e resíduos reciclados de outras indústrias respectivamente. Todavia, é preciso sempre atentar-se para que seja mantida a qualidade do material com a finalidade de garantir a maior vida útil possível na fase de serviço, de maneira a minimizar o consumo de recursos naturais (VALIPOUR *et al.*, 2014; INGRAO *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2010; BLANKENDAAL *et al.*, 2014; CELIK *et al.*, 2015).

Na parte logística do processo, os estudos estão analisando os tipos de transporte, as distâncias e a localização geográfica das usinas, de modo a encontrar a maior interação possível (MARINKOVIĆ *et al.*, 2010; DONG *et al.*, 2015; GURSEL *et al.*, 2014). No fim do ciclo de vida, os resíduos gerados estão sendo analisados para serem aproveitados ao máximo e de preferência tornarem-se novamente insumos na produção de mais concretos ou de uma outra cadeia produtiva industrial (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; LAURENT, 2014a, b).

2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV): ABORDAGEM CONCEITUAL E MÉTODOLÓGICA

Com a importância das questões ambientais, muitas empresas e centros de pesquisas vêm aprimorando suas práticas de desenvolvimento sustentável. São estimulados por órgãos de controle ambiental e pela grande mídia, os quais refletem o interesse global pela redução dos impactos ambientais, com o objetivo de manter a qualidade dos ecossistemas e garantir maior qualidade de vida para os seres vivos.

Os agentes que norteiam a produção sustentável não se prestam somente ao atendimento de legislações e normas, mas também no compromisso com o meio ambiente. Objetivam fazer com que os novos processos produtivos não se direcionam apenas à busca da alta produtividade irresponsável e do lucro incondicional, mas passem a seguir a tendência mundial de usar os recursos renováveis e otimizar o uso dos recursos não renováveis ao avaliar o grau de exploração das matérias-primas, de modo a garantir a conservação desses recursos para as gerações futuras.

Para auxiliar as indústrias no processo de melhoria da gestão ambiental foi desenvolvida a ferramenta denominada Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), em que o ciclo de vida é a sequência de transformações de materiais e de energia que inclui a extração de matérias-primas, fabricação, distribuição, utilização, recuperação de materiais, reciclagem e reuso. Visa estudar nesse ciclo como a sociedade pode otimizar a utilização de seus recursos atendendo às necessidades humanas sem perdas dos atributos de qualidade (RASHID e YUSOFF, 2015). Na seção 2.2.1 aborda-se o processo de normatização do método de ACV.

2.2.1. NORMATIZAÇÃO DO MÉTODO DE ACV

Os primórdios da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ocorreram entre a década de 60 e 80, quando as grandes organizações industriais da época decidiram inventariar os consumos energéticos envolvidos na fabricação de seus produtos para melhorar a utilização dos recursos naturais e buscar alternativas melhores de energia durante a primeira crise do petróleo.

Na década de 60, focando discussões políticas sobre reciclagem, a Coca-Cola contratou a *Midwest Research Institute* (MRI) para avaliar vários tipos de embalagens

que condicionavam os produtos da empresa. O objetivo foi verificar qual delas causaria o menor impacto ambiental quanto às emissões ao meio ambiente e o melhor desempenho em relação ao consumo de recursos naturais. Esse estudo ficou conhecido como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA).

Durante os anos seguintes, as análises ambientais foram se tornando mais populares focando muitas pesquisas e diferentes processos produtivos, fazendo com que, em 1974, a metodologia conhecida até então como REPA fosse aprimorada pelo MRI, sendo considerada a precursora da atual ACV.

Anos depois, a diversidade dos estudos e dos resultados apresentados pela aplicação da ACV ressaltou a necessidade de haver uma padronização metodológica e o estabelecimento de critérios rígidos que orientassem a conduta dos estudos antes de serem levados ao público. Para isso, internacionalmente foi criado a *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), a primeira instituição que iniciou os trabalhos de sistematização e padronização dos termos e critérios da ACV.

Em 1993, a ISO criou o Comitê Técnico TC-207 para elaborar normas de sistemas de gestão ambiental e suas ferramentas. Já em 1997, foi elaborada a série ISO 14.040 (2006) e, em 2006, a série ISO 14.044 (2006), que atualmente abrange as principais e mais importantes normas para ACV, aplicando-se a diversas atividades industriais, extrativas, agroindustriais, comerciais, de serviços e governamentais. Ao direcionar esforços para a indústria do concreto, o Comitê Técnico TC-71, responsável por estabelecer diretrizes e parâmetros para as normas técnicas de concreto, em 2012 elaborou a ISO 13.315-1 (2012), a qual fornece estrutura e regras básicas de gestão ambiental para concretos. Posteriormente, em 2014, elaborou a ISO 13.315-2 (2014), que fornece princípios e requisitos relacionados com a determinação dos limites do sistema e aquisição de dados de inventário para ACV. O Quadro 2 expõe as diretrizes em ordem cronológica crescente das séries ISO 14.040 (2006), ISO 14.044 (2006) e ISO 13.315 (2012).

Quadro 2 - Normas das séries ISO 14.040 (2006), ISO 14.044 (2006) e ISO 13.315 (2012)

Norma	Ano de publicação	Última Atualização	Título da Norma	Descrição da Norma
ISO 14.040	1997	2006	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - Princípios e estruturas	Estabelecem os princípios básicos e requisitos para a realização e divulgação dos resultados de estudos de ACV.
ISO 14.041	1998	2006	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - Objetivos e escopo, definição e análise de inventários	Detalham os requisitos para o estabelecimento do objetivo e escopo de um estudo de ACV.
ISO 14.042	2000	2006	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - Avaliação de impacto do ciclo de vida	Apresentam os princípios gerais para a realização da Avaliação de Impactos, a seleção das categorias de impacto, descrevem as etapas de classificação e de caracterização.
ISO 14.043	2000	2006	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - Interpretação do Ciclo de vida	Apresentam os requisitos e recomendações para a interpretação dos resultados de uma análise de inventário ou avaliação de impacto.
ISO 14.044	2006	2006	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - Requerimentos e diretrizes	Especifica requisitos e proporciona uma guia para a avaliação do ciclo de vida, incluindo exemplos.
ISO 13.315-1	2012	2012	GESTÃO AMBIENTAL PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO E CONCRETO - Parte 1: Princípios gerais	Fornece estrutura e regras básicas de gestão ambiental relacionada com estruturas de concreto e concreto. Isso inclui a avaliação dos impactos e métodos de implementação de melhoria ambiental com base na avaliação ambiental.
ISO 13.315-2	2014	2014	GESTÃO AMBIENTAL PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO E CONCRETO - Parte 2: Limite de Sistema e Dados de Inventário	Fornece um quadro geral, princípios e requisitos relacionados com a determinação dos limites do sistema e aquisição de dados de inventário necessária para a realização de uma ACV de concreto, concreto pré-moldado e estruturas de concreto.

Fonte: Adaptado da série ISO 14.040 (2006), ISO 14.044 (2006) e ISO 13.315 (2012)

Na seção 2.2.2 será apresentada a ferramenta de ACV, com destaque para suas fases de aplicação.

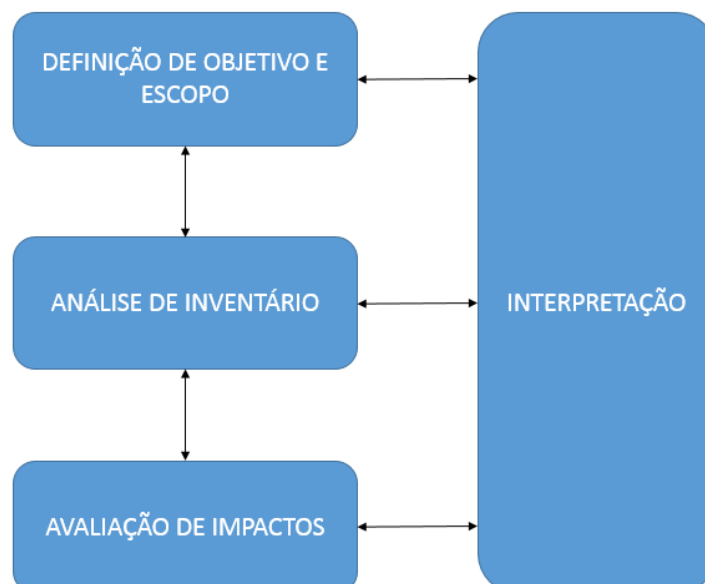
2.2.2. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia para avaliar os potenciais impactos ambientais e os recursos utilizados ao longo do ciclo de vida de um produto de forma qualitativa e quantitativa, ou seja, a gestão dos impactos ambientais é abordada desde

a extração da matéria-prima até as fases de produção, utilização, descarte e reciclagem e, para isso, dados específicos do processo de produção são necessários (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; MARINKOVIC *et al.*, 2010; ORTIZ *et al.*, 2009; GUINÉE *et al.*, 2011; PANDEY *et al.*, 2011; OZAWA-MEIDA *et al.*, 2013). A ACV é uma metodologia para analisar as interações entre as atividades humanas e o meio ambiente em caráter analítico com visão gerencial. Além disso, permite destacar e avaliar os pontos críticos e as margens de melhorias do ciclo de vida de um produto (CHAUHAN *et al.*, 2011; LOFGREN *et al.*, 2011; MANDA *et al.*, 2014; LARRIVA *et al.*, 2014; INGRAO *et al.*, 2014)

A descrição da metodologia de ACV é baseada nos requisitos das normas internacionais da série ISO 14.040 (2006) e ISO 14.044 (2006) e consiste em quatro etapas de análises distintas, conforme a Figura 2: a definição do objetivo e escopo, criação e análise de um inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e a interpretação dos resultados (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; INGRAO *et al.*, 2014; INGRAO *et al.*, 2014; CABEZA *et al.*, 2014; MONTEIRO e FREIRE, 2012; RASHID e YUSOFF, 2015; MARINKOVIC *et al.*, 2010).

Figura 2- Fases da ACV



Fonte: Adaptado da ISO 14.040 (2006)

2.2.2.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

A primeira etapa da metodologia de ACV é a definição do objetivo e escopo que tem como foco proporcionar um limite específico das considerações de impacto ambiental levando em consideração a infinidade de parâmetros que podem ser analisados em uma cadeia produtiva (LI *et al.*, 2010; RASHID e YUSOFF, 2015).

O objetivo de um estudo de ACV deve declarar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo, isto é, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo de modo a evidenciar quais devem ser os dados e quais unidades devem ser consideradas (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; MARINKOVIC *et al.*, 2010; INGRAO *et al.*, 2014). Na definição do escopo devem ser considerados e claramente descritos a função e a unidade funcional (litro, m², m³, etc.), as fronteiras dos sistemas, os requisitos da qualidade dos dados, as comparações entre os sistemas e as considerações sobre as análises críticas (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; MARINKOVIC *et al.*, 2010; INGRAO *et al.*, 2014; MARINKOVIC *et al.*, 2010).

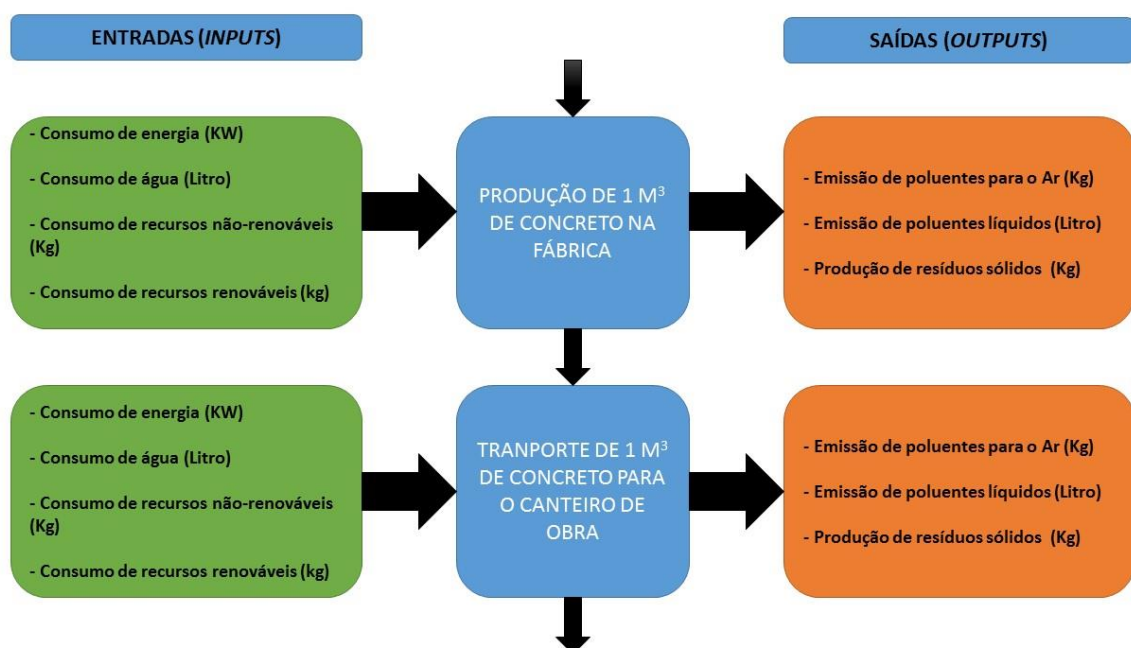
Segundo a norma ISO 14.041(2006), na definição de objetivos e do escopo devem ser especificados a definição da unidade funcional, o processo do produto estudado, as fronteiras do sistema, os procedimentos de alocação das entradas e saídas, os tipos de impactos avaliados, os requisitos da qualidade dos dados com período de tempo de coleta e a área geográfica de cobertura e, por fim, a fonte dos dados coletados.

2.2.2.2. CRIAÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

A criação e análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) envolve a compilação e a quantificação dos fluxos de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*). Inclui a coleta e análise de dados pertinentes a um sistema produtivo, sendo que esses dados também constituem a entrada para avaliar o impacto do ciclo de vida e compreende um extenso banco de dados, tornando-se a etapa que demanda mais tempo para ser realizada (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; MARINKOVIC *et al.*, 2010; INGRAO *et al.*, 2014; RASHID e YUSOFF, 2015)

O ICV deve conter dados sobre todas as entradas e saídas de cada processo individual do sistema examinado, como emissões de poluentes, materiais e recursos em suas diferentes fases (obtenção das matérias-primas, transportes de insumos, fabricação do produto, transporte do produto, fase de utilização, descarte, reciclagem e reutilização) e adotar uma unidade padrão (ex. m³) do material conforme ilustrado na Figura 3 (SUH e HUPPES, 2005; ZHOU *et al.*, 2011; SHERWANIA *et al.*, 2010; KUA e KAMATH, 2014).

Figura 3 - Entradas e saídas do Inventário do Ciclo de Vida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ICV documenta os fluxos de energia, materiais e emissões, a fim de representar a relação entre os processos unitários, bem como seus impactos ao meio ambiente. Entretanto, o ciclo de vida de um produto compõe-se de centenas e milhares de processos unitários e coletar todos esses dados consumiria muito tempo e recursos, inviabilizando alguns estudos. Assim, uma alternativa mais pragmática é utilizar bancos de dados de inventários de ciclo de vida nos quais ficam armazenados dados de inventário de vários processos produtivos específicos de um país de origem (TAKANO *et al.*, 2014; HONG DONG *et al.*, 2015; CHERUBINI *et al.*, 2008)

A Quadro 3 fornece informações referentes ao desenvolvedor, país de origem e a principal fonte de dados de 5 bancos de dados utilizados internacionalmente.

Quadro 3 - Visão geral de 5 bancos de dados utilizados internacionalmente.

Banco de dados	Desenvolvedor	País de Origem	Principal fonte de dados
GaBi	PE Internacional	Alemanha	Dados industriais / Dados da Literatura / Outros Bancos de dados
Ecoinvent	Centro de inventário de ciclo de vida da Suíça	Suíça	Dados industriais / Dados da Literatura
IBO	Instituto Austríaco de Construção Ecológica	Áustria	Dados industriais / Dados da Literatura / Outros Bancos de dados
CFP	Associação das Indústria do Japão	Japão	Dados estatísticos / Dados da Literatura
Synergia	Instituto Finlandês do Meio Ambiente	Finlândia	Dados industriais / Dados da Literatura

Fonte: Adaptado de Takano *et al.* (2014).

Os bancos de dados contribuem para otimizar o tempo de aplicação de uma ACV e são constituídos por diversas bases de dados, contendo várias informações de caráter ambiental sobre a produção de bens de consumo. São importantes para o tratamento e a coleta de dados. Caso contrário, os estudos se tornariam lentos e imprecisos e poderiam se tornar ultrapassados antes mesmo do tratamento dos dados (RIBEIRO, 2009). Vale ressaltar que, quando se necessita de informações que não fazem parte de nenhum banco de dados, pode ser feita uma estimativa, desde que essas estimativas sejam baseadas em dados existentes (COSTA, 2007).

Diante da importância e relevância dos bancos de dados para ICV fica evidente a necessidade mundial em desenvolvê-la para dar subsídio aos estudos de ACV. Torna-se, então, necessária a colaboração das instituições de pesquisa para a criação dos bancos de dados, do governo para definir políticas públicas, e das empresas para disponibilizar os dados sobre os processos produtivos dos produtos.

2.2.2.3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Na etapa de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) tem-se como objetivo compreender e avaliar os impactos ambientais com base na análise de inventário, no escopo e nas razões para conduzir o estudo. Pode-se afirmar que essa etapa é a mais importante e mais crítica do estudo, pois as normas da família ISO 14.040 (2006) não

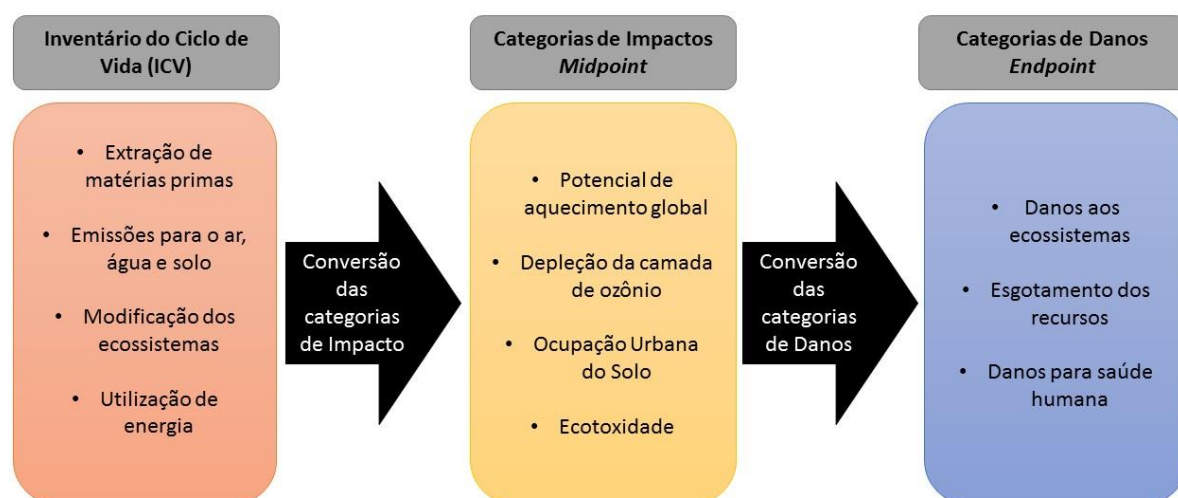
estabelecem um critério fixo de avaliação, gerando discrepâncias de um estudo para outro (VAN DEN HEEDÉ e DE BELIE 2012; MARINKOVIC *et al.*, 2010; INGRAO *et al.*, 2014; RASHID e YUSOFF, 2015).

Nessa fase, os dados são agrupados em categorias de impactos específicos de acordo com algum método de avaliação de impacto e que podem ser divididos em métodos de única categoria (*single-category*) ou de muitas categorias (*multi-category*). Desse modo, os métodos *multi-category*, que são os mais utilizados, podem ser orientados ao problema (*midpoint*) ou orientados aos danos (*endpoint*), sempre com o mesmo objetivo de classificar, caracterizar, normalizar e valorar os potenciais impactos sobre os ecossistemas, saúde humana e a depleção de recursos naturais (MONTEIRO e FREIRE, 2012; OOTEGHEM e XU, 2012).

Na abordagem *midpoint*, todas as substâncias referentes ao ICV são adequadamente agregadas em categorias de impacto de acordo com uma característica comum de relação de causa e efeito, listando os indicadores de impacto em potencial e não representando as consequências finais sobre o percurso ambiental das emissões listadas (CAVALETT *et al.*, 2012; PENNINGTON *et al.*, 2004). Essa classificação em geral desfruta de um maior consenso científico, visto que aborda questões como as alterações climáticas, a destruição da camada de ozônio, toxicidade humana, acidificação, esgotamento dos recursos abióticos e eutrofização (BARE *et al.*, 2000)

Já na abordagem *endpoint* menciona-se os danos como resultados das alterações climáticas que estão ligadas às categorias de impactos do *midpoint* e se descreve uma modelagem que caracteriza a gravidade dos danos ambientais provenientes do ICV (CAVALETT *et al.*, 2012; BARE *et al.*, 2000)

Pelo fato dos métodos *endpoint* serem direcionados aos danos, são geralmente considerados mais compreensíveis para os tomadores de decisão, contudo possuem alta subjetividade. De modo contrário, os métodos *midpoint* apresentam menor subjetividade, mas também possuem menos relevância no suporte à tomada de decisão (BARE *et al.*, 2000). A Figura 4 representa os momentos de interpretação da abordagem *midpoint* e *endpoint*.

Figura 4 - Abordagem *midpoint* e *endpoint*.

Fonte: Adaptado de Blankendaal *et al.* (2014).

Os métodos de AICV estão integrados às bases de dados e implementados as ferramentas computacionais de ACV. Convém ressaltar que diversas metodologias são utilizadas, logo, não existe um método único para essa etapa (PIZZOL *et al.*, 2011). De acordo com o Manual AICV "Análise de metodologias de avaliação de impacto ambiental existentes para uso em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)" (ILCD HANDBOOK, 2010), as principais metodologias de AICV são listadas no Quadro 4, bem como seu desenvolvedor, país de origem e abordagem.

Quadro 4 - Principais metodologias de AICV

Metodologia	Desenvolvedor	País de origem	Abordagem
CML 2002	CML	Holanda	<i>Endpoint</i>
Eco-indicator 99	Pré Consultants	Holanda	<i>Endpoint</i>
EDIP97 - EDIP2003	DTU	Dinamarca	<i>Midpoint</i>
EPS 2000	IVL	Suécia	<i>Endpoint</i>
Impact 2002+	EPFL	Suíça	<i>Midpoint /Endpoint</i>
LIME	AIST	Japão	<i>Midpoint /Endpoint</i>
LUCAS	CIRAIG	Canadá	<i>Midpoint</i>
ReCiPe	RUN + PRé + CML + RIVM	Países Baixos	<i>Midpoint /Endpoint</i>

Fonte: Adaptado de *ILCD handbook* (2010)

Quadro 4 (continuação) - Principais metodologias de AICV

Metodologia	Desenvolvedor	País de origem	Abordagem
Swiss Ecoscarcity 07	E2 + SEU-services	Suíça	<i>Midpoint</i>
TRACI	US EPA	Estados Unidos	<i>Midpoint</i>
MEEuP	VhK	Holanda	<i>Midpoint</i>

Fonte: Adaptado de *ILCD handbook* (2010)

2.2.2.4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A Interpretação dos resultados é a fase na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são combinadas, de forma consistente com o objetivo e o escopo definidos, de modo a alcançar conclusões, explicitar limitações que podem tornar os objetivos iniciais inalcançáveis, identificar as principais fases do ciclo de vida que contribuem para os impactos ambientais e fornecer recomendações finais (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; MARINKOVIC *et al.*, 2010; INGRAO *et al.*, 2014; RASHID e YUSOFF, 2015). Vale ressaltar que a fase de interpretação é extremamente importante, pois é a chave para tornar os resultados da avaliação de impacto comparáveis e compreensíveis.

2.2.3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ACV

Devido à grande quantidade de dados necessários para realizar um estudo de ACV é fundamental utilizar um software, pois torna o estudo mais eficiente, lembrando que esses softwares são integrados com banco de dados de inventários e metodologias de análise de impacto (BRIBIÁN *et al.*, 2009; MARTINEZ *et al.*, 2015). Atualmente existem vários softwares de ACV, como mostra o Quadro 5, que permitem estudos com graus de detalhamento diferentes (MARINKOVIC *et al.*, 2010; DING, 2008; ISLAM *et al.*, 2015).

Quadro 5 - Exemplos de Softwares de ACV

Softwares de ACV	Site do fabricante	País de origem
Boustead	www.boustead-consulting.co.uk	Reino Unido
Eco-it	www.pre.nl	Holanda
Ecopro	www.sinum.com	Holanda
Ecscan	www.ind.tno.nl	Holanda

Fonte: Adaptado de Bribián *et al.* (2009) e Islam *et al.* (2015)

Quadro 5 (continuação) - Exemplos de *Softwares* de ACV

Softwares de ACV	Site do fabricante	País de origem
KCL Eco	www.kcl.fi/eco	Finlândia
Gabi	www.gabi-software.com	Alemanha
LCAit	www.ekologik.cit.chalmers.se	Suécia
Miet	www.leidenuniv.nl/cml/ssp/software	Holanda
Pems	www.piranet.com/pack/lca_software.htm	Estados Unidos
SimaPro	www.pre-sustainability.com	Holanda
Team	www.ecobilan.com	França
Wisard	www.pwcglobal.com	França
Umberto	www.umberto.de	Alemanha
LCA PIX	www.kmlmtd.com	Estados Unidos

Fonte: Adaptado de Bribián *et al.* (2009) e Islam *et al.* (2015)

Os *softwares* de ACV disponibilizam bancos de dados e métodos de AICV integrados ao próprio sistema, resultando em redução do tempo necessário para a coleta de dados de inventário, além de realizar a avaliação de impactos gerando gráficos e tabelas. Consequentemente, facilitam a interpretação dos resultados (MARTINEZ *et al.*, 2015; ISLAM *et al.*, 2015)

Todos os *softwares* são projetados para auxiliar o usuário na fase de inventário da ACV. Para isso, devem oferecer facilidade de uso e capacidade para processar os dados e produzir resultados com rapidez e precisão, levando-se em consideração que cada pacote de *softwares* tem seus méritos e suas desvantagens, em termos de preço ou funcionalidade.

2.2.4. REVISÃO DE LITERATURA DA ACV APLICADO NA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE CONCRETOS

ACV tem sido utilizado no setor da construção desde 1990, e é uma ferramenta importante para avaliar impactos ambientais tanto de materiais quanto para avaliar o desempenho de edificações (TABORIANSKI e PRADO, 2004; FAVA, 2006; CABEZA *et al.*, 2014; BRAS e GOMES, 2015). A metodologia tornou-se amplamente utilizada devido à sua forma integrada de tratar temas como enquadramento ambiental, avaliação de impacto e qualidade dos dados (KLOPPFFER, 2006).

Dentro da indústria da construção, os estudos de ACV podem ser realizados em quatro níveis diferentes de limites do sistema. Em um primeiro nível pode ser citada a

abordagem *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”), que só considera os impactos da extração de matéria-prima, produção do material até o produto final sair da fábrica; no segundo nível tem-se a abordagem *cradle-to-site* (“do berço ao local da obra”), que só considera os impactos da extração de matéria-prima, produção do material até o produto final sair da fábrica e transporte até o canteiro de obra; no terceiro nível há a abordagem *cradle-to-grave* (“do berço ao túmulo”), que considera os impactos da extração de matéria-prima, produção do material, produto final saindo da fábrica, utilização, demolição e a fase de resíduos. Por fim, em um quarto nível, com um foco maior em sustentabilidade, tem-se a abordagem *cradle-to-cradle* (“do berço ao berço”), que considera os impactos da extração de matéria-prima, produção do material, produto final saindo da fábrica, utilização, demolição, fase de resíduos, reciclagem e reutilização profunda dos resíduos (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012; HOSSAIN, 2016)

Em um contexto de produção sustentável na construção civil, os produtos devem ser concebidos de tal maneira que no início do seu ciclo de vida absorvam resíduos reciclados como matéria-prima, e no final de seu ciclo de vida possam ser reciclados e reutilizados para se tornarem matérias-primas para outro sistema produtivo. A produção de concreto deve ser baseada nesse conceito, no qual seu projeto e sua mistura podem ser ajustados de tal maneira que absorvam resíduos no início de seu ciclo de vida. E, no fim do ciclo de vida, seus detritos devem ser utilizados como matéria-prima na produção de cimento e agregados na fabricação de novos concretos (VAN DEN HEEDE e DE BELIE 2012).

Para melhor compreender os avanços científicos na tentativa de diminuir os impactos ambientais do ciclo de vida do concreto foram identificados 15 estudos, conforme o Quadro 6, que descrevem características gerais das aplicações da metodologia de ACV na avaliação ambiental de concretos comuns e concretos ecológicos.

Quadro 6 - Estudos de ACV aplicados na produção de concreto

Referência	País	Ano de publicação	Aplicação de ACV
MILLER <i>et al.</i>	Estados Unidos	2016	Técnicas implementáveis para reduzir as emissões anuais de CO ₂ provenientes da produção de cimento a partir da utilização de materiais cimentícios suplementares na fabricação de concreto.
SETO <i>et al.</i>	Canadá	2016	Avaliação de cinco ferramentas computacionais de ACV no contexto da análise de misturas de concreto.
TURK <i>et al.</i>	Eslovênia	2015	Uma série de misturas de concreto verdes que têm propriedades básicas semelhantes foram avaliadas do ponto de vista ambiental, por meio do método de Avaliação do Ciclo de Vida, e em comparação com uma mistura de concreto convencional correspondente.
CELIK <i>et al.</i>	Estados Unidos	2015	Duas misturas de concreto foram comparadas para medir a emissão de poluentes utilizando a ferramenta “GreenConcrete LCA”, desenvolvida especificamente para fazer ACV em concretos.
HONG DONG <i>et al.</i>	China	2015	Investigação da substituição de dados de ICV de banco de dados internacionais por dados locais em estudos de concretos fabricados em Hong Kong.

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 6 (continuação) - Estudos de ACV aplicados na produção de concreto

Referência	País	Ano de publicação	Aplicação de ACV
LAURENT <i>et al.</i>	Dinamarca	2014a	Revisão crítica de 222 estudos de ACV publicados sobre sistemas de gestão de resíduos sólidos abordando lições aprendidas e perspectivas.
LAURENT <i>et al.</i>	Dinamarca	2014b	Revisão crítica de 222 estudos de ACV publicados sobre sistemas de gestão de resíduos sólidos abordando orientações metodológicas para uma melhor prática.
INGRAO <i>et al.</i>	Itália	2014	Aplicação de ACV na avaliação ambiental dos fluxos de entrada e de saída de emissões de poluentes relacionados com a produção de concreto, utilizando agregados de basalto.
GURSEL <i>et al.</i>	Estados Unidos	2014	Análise dos pontos fortes e fracos dos ICVs de concreto oferecendo um roteiro de investigação para melhorar a qualidade dos futuros ICVs dos processos de fabricação de concreto atendendo às necessidades de grandes usuários de ACV.
BLANKENDAAL <i>et al.</i>	Holanda	2014	Aplicação de ACV para avaliar alternativas de redução de impacto ambiental na fabricação de concreto e asfalto.
VALIPOUR <i>et al.</i>	Irã	2013	Aplicação de ACV para avaliar o potencial de aquecimento global do concreto contendo zeólito em comparação com um concreto convencional.

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 6 (continuação) - Estudos de ACV aplicados na produção de concreto

Referência	País	Ano de publicação	Aplicação de ACV
VAN DEN HEEDE e DE BELIE	Bélgica	2012	Revisão de literatura da ACV aplicada na produção de concretos comuns e concretos ecológicos.
MARINKOVIC <i>et al.</i>	Sérvia	2010	Aplicação de ACV para comparar os impactos ambientais de concretos produzidos com agregados naturais e agregados reciclados.
CHEN <i>et al.</i>	França	2010	Aplicação de ACV para avaliar a utilização de resíduos reciclados como subprodutos da produção de concreto.
HABERT <i>et al.</i>	França	2010	Proposta de um indicador confiável de esgotamento regional de recursos para produção de concreto.

Fonte: Elaborado pelo autor

O concreto é o principal produto fabricado e vendido no mundo. Assim, seus subprodutos representam um grande volume da produção industrial, razão que justifica a pesquisa realizada por Habert *et al.* (2010), na qual se argumenta a necessidade de haver um método de AICV específico para a produção de concreto com indicadores mais confiáveis de esgotamento regional de recursos naturais. Ele foi o primeiro trabalho a identificar tal necessidade. A pesquisa tinha como objetivo propor um indicador confiável, bem como pretendia avaliar o atual estado de esgotamento dos recursos naturais locais em diferentes regiões, pois os indicadores comumente utilizados para avaliar o consumo de recursos na AICV não estão totalmente adaptados ao setor específico da indústria de concreto. Para solucionar essa falha, uma nova maneira de calcular esse consumo de recursos foi proposta utilizando uma avaliação específica do estoque de recursos para a realidade da fabricação de concreto. Com a nova proposta foi possível distinguir os diferentes impactos sobre os recursos utilizados na fabricação de concreto, porém essa nova

proposta não foi localizada em outras pesquisas e nem foi integrada em metodologias específicas de AICV utilizadas internacionalmente.

Uma outra alternativa para solucionar problemas de esgotamento de recursos pode-se observar na pesquisa de Chen *et al.* (2010), que avaliaram a utilização de resíduos, como a escória de alto forno e cinzas volantes como insumos para a produção de concreto na substituição de parte do cimento Portland, permitindo a economia de insumos não renováveis e também poupando e evitando o esgotamento de tais insumos.

Na indústria do concreto, é notória a preocupação com o esgotamento de recursos não renováveis. Assim, alternativas para utilizar agregados originados da reciclagem de concreto também estão sendo bastante estudadas. Um exemplo é a pesquisa de Marinkovic *et al.* (2010), que teve como um de seus objetivos comparar a ACV de concretos produzidos com agregados naturais (NAC) e concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RAC), fazendo descobertas consideráveis.

No estudo de Marinkovic *et al.* (2010), a parte analisada do ciclo de vida do concreto inclui a produção e o transporte de agregados e cimento, produção de concreto na fábrica e transporte do concreto até o canteiro de obras. A fase de construção, a fase de serviço e a fase de demolição não são consideradas no estudo, pois ambos os concretos foram projetados para cumprirem requisitos funcionais semelhantes. Assim, considerou-se que essas fases não influenciam no resultado da pesquisa. Os resultados da ACV mostraram que o total de impactos ambientais em termos de uso de energia, aquecimento global, eutrofização, acidificação e de criação de oxidantes fotoquímicos dependem principalmente das distâncias e dos tipos de transporte praticados no processo. Ressaltaram que a viabilidade ambiental de se utilizar agregados reciclados só é obtida com as usinas de reciclagem localizadas perto das concreteiras, porém, existe um ganho significativo nas categorias de diminuição de resíduos e minimização do esgotamento dos recursos naturais.

Diante desse contexto, diversas pesquisas de impactos ambientais aplicadas em comparações de concretos ecológicos com concretos tradicionais vêm sendo desenvolvidas. Em 2012, a pesquisa realizada por Van Den Heede e De Belie (2012)

traz uma revisão da literatura dos fatores que influenciam uma ACV para esses concretos levantando três pontos principais que precisam ser observados com maior atenção: (I) na definição do objetivo e escopo a escolha da unidade funcional é vista como um dos fatores que mais influenciam sendo necessário selecionar uma unidade em que todas as características físicas e químicas sejam iguais em ordem de grandeza; (II) na etapa de criação e análise de inventário, a qualidade dos dados influenciam muito o bom resultado da ACV, assim, a preferência vai para os dados coletados em primeira mão mais adaptados à região do estudo para garantir a exatidão e representatividade; por fim, (III) na análise de impactos, o método de AICV deve analisar mais do que apenas alterações climáticas e deve ser orientado ao problema.

A grande preocupação com as emissões dos gases de efeito estufa gerados pela indústria do cimento é tema do estudo de Valipour *et al.* (2013), no qual é realizada uma comparação da ACV de um concreto convencional com concretos fabricados com zeólito, substituindo parcialmente o cimento para se alcançar menores emissões de gases do efeito estufa. No estudo, o autor compara um concreto convencional com três concretos produzidos com uma substituição de 10%, 20% e 30% do cimento por zeólito. Com a ACV foi possível identificar uma redução do potencial de aquecimento global de 60,3%, 69,7%, e 64,3%, respectivamente.

Com base nos estudos de Valipour *et al.* (2013), a metodologia ACV demonstrou-se muito eficiente para verificar a emissão de gases do efeito estufa e fazer a comparação, visto que os resultados mostraram uma redução significativa do Índice de aquecimento global ao utilizar o zeólito. Também é importante ressaltar que o estudo mostrou que a substituição de partes do cimento por zeólito pode diminuir o potencial de aquecimento global. Porém, apenas com a ACV foi possível identificar uma porcentagem ótima de substituição para identificar a mistura mais eficiente.

No ano de 2014, a aplicação da metodologia ACV conquistou ainda mais espaço no setor de produção do concreto. Podem ser citadas pesquisas como a de Blankendaal *et al.* (2014) que, assim como Chen *et al.* (2010), avaliam alternativas de redução de impactos ambientais utilizando um método *Endpoint* de AICV denominado ReCiPe para comparar 10 cenários de misturas de concreto de modo a identificar o melhor cenário. O autor resume que a melhor forma de diminuir os impactos ambientais do

concreto é substituir parte do cimento Portland por adições minerais recicladas ou recuperadas, ressaltando que a utilização da escória de alto forno e cinzas volantes pode reduzir os impactos ambientais no ciclo de vida do concreto em 39%.

No mesmo ano, a pesquisa feita por Gursel *et al.* (2014) faz três alertas importantes que precisam ser tratados com mais atenção em trabalhos futuros de ACV de concretos, os quais se referem: (I) à falta de uma avaliação holística dos impactos ambientais em ACVs atuais, pois os estudos estão se concentrando na utilização de energia e nas emissões de gases de efeito estufa e estão deixando de analisar outros fatores, como compostos orgânicos voláteis, metais pesados e outras emissões tóxicas provenientes de insumos da produção de concreto, (II) à falta de aplicações de variações regionais e tecnológicas nos atuais estudos de ACV, e (III) ao negligenciamento de etapas, as quais são consideradas insignificantes com base em suposições ou estudos anteriores.

Dos estudos abordados nesta pesquisa, aquele que melhor exemplifica a metodologia de ACV na fabricação de concreto foi realizado por Ingrao *et al.* (2014), que traz uma aplicação completa da metodologia para realizar uma avaliação ambiental dos fluxos de entrada e de saída relacionados com a produção de concreto utilizando agregados de basalto na Itália. Para realizar o estudo utilizou a base de dados Ecoinvent, método de impacto Impact 2002+, e para processar os dados um Software denominado *SimaPro* que é a ferramenta computacional mais utilizada atualmente nos estudos de ACV. Os resultados do estudo apontaram como categoria de dano mais afetada a “Saúde Humana” por consequência das emissões de particulados pela extração de basalto.

A preocupação com os resíduos sólidos é o foco das pesquisas de Laurent *et al.* (2014a,b), enfatizando que a ferramenta de ACV é fundamental para melhorar a eficiência dos sistemas de gestão de resíduos sólidos. Laurent *et al.* (2014a,b) realizaram uma revisão crítica de 222 estudos de ACV aplicados nos sistemas de gestão de resíduos sólidos observando distribuição geográfica, os tipos de resíduos que estão sendo analisados e a qualidade desses estudos. Constataram que esses estudos estão concentrados principalmente na Europa, com pouca aplicação em países em desenvolvimento, bem como tem ignorado a aplicação para resíduos de construção e demolição que apresentam grande relevância no ciclo de vida do

concreto. Na questão da qualidade dos estudos, os resultados mostram que a metodologia ACV está sendo aplicada de forma equivocada em vários aspectos da avaliação, gerando resultados duvidosos. Exemplos são um abandono frequente da definição de objetivo, uma frequente falta de transparência e precisão na definição do escopo, uma delimitação pouco clara dos limites do sistema, dificuldades em capturar as especificações locais influentes, como composições representativas de resíduos para o inventário, e uma frequente incerteza na análise dos resultados. Para aprimorar a aplicação da metodologia de ACV na gestão de resíduos sólidos, Laurent et al (2014b) fornecem recomendações detalhadas para cada fase do estudo.

Também foram analisados três importantes estudos datados de 2015. Na pesquisa feita por Hong Dong *et al.* (2015) investiga-se a substituição de dados de ICV de banco de dados internacionais por dados locais em estudos de concretos fabricados em Hong Kong. Isso porque atualmente a maioria das bases de dados disponibilizada internacionalmente é alimentada com dados da realidade europeia, dificultando estudos de ACV realizados em outros continentes, sendo que as principais mudanças na ACV do concreto são decorrentes dos ajustes do cimento e distâncias e dos tipos de transporte.

A pesquisa conduzida por Celik *et al.* (2015) apresenta uma grande evolução ao utilizar uma ferramenta computacional específica para ACV da produção de concreto denominada “*GreenConcrete LCA*”, desenvolvida por Gursel e Horvath (2012) na Universidade da Califórnia. Ela avalia os perfis ambientais de misturas de concreto por meio de duas entradas diretas e da cadeia de fornecimento. A ferramenta também é capaz de fazer variações regionais e alterações tecnológicas nos processos de produção, porém não foi possível encontrar informações sobre qual o banco de dados a ferramenta está atrelada e qual método de AICV ela utiliza para avaliar os impactos. A ferramenta está disponível no website <http://greenconcrete.berkeley.edu/>. A pesquisa de Celik *et al.* (2015) evidencia um grande avanço nos estudos sobre concretos, pois possibilita uma nova abordagem para avaliar adições minerais alternativas, ressaltando que, além das análises referentes às propriedades mecânicas do material alternativo, deve-se dar uma importância maior para todo seu ciclo de vida por meio do estudo de ACV.

Nessa tendência, o estudo de Turk *et al.* (2015) analisou do ponto de vista ambiental uma série de misturas de concretos verdes com propriedades semelhantes. As misturas foram preparadas a utilizando três subprodutos industriais (areia de fundição, escória de aço e cinzas). Com a ACV foi possível identificar que o melhor cenário foi elaborado com cinzas volantes e areia de fundição, especialmente para aquelas situações baseadas na utilização combinada de agregados reciclados com estes dois materiais alternativos.

Em 2016 foram publicados dois importantes estudos com grande relevância para esta dissertação. Seto *et al.* (2016) avaliam cinco *Softwares* de ACV no contexto das análises de misturas de concreto contendo subprodutos industriais. Dois pacotes de *Softwares* se destacam nas características mais relevantes e um deles é o *SimaPro* (ferramenta computacional utilizada nesta dissertação). A pesquisa de Seto *et al.* (2016) salienta que as ferramentas de *software package*, como o *SimaPro* são superiores às ferramentas *web tools* como o “*GreenConcrete LCA*”, pois oferecem maior qualidade nos produtos e serviços, tais como acesso a bancos de dados maiores, mais recursos aprimorados e suporte técnico mais abrangente. Por fim, Miller e Monteiro (2016), utilizando a ACV, levantaram três pontos relevantes para diminuir em mais de 20% as emissões mundiais de CO₂ referentes à produção de concreto. Os mecanismos considerados são os seguintes: (1) o aumento da utilização de cinzas volantes e escórias, assim como um aumento da utilização de material de enchimento de calcário (em 20% e 35% de substituição), como componentes dos materiais do cimento; (2) alocação ideal dos materiais cimentícios complementares; e (3) quando possível se beneficiar do desenvolvimento da resistência do concreto, passando dos tradicionais 28 dias e usando idades de projeto superiores. Os métodos selecionados não necessitam de alterações no equipamento de produção ou fontes de combustível, o que sugere que poderiam ser rapidamente implementados se forem aceitos pelos órgãos competentes.

2.3. CONCLUSÕES ACERCA DA REVISÃO DE LITERATURA

A presente revisão de literatura compila conceitos e ferramentas de ACV aplicados na fabricação de concretos, que é uma metodologia inovadora para melhorar a

sustentabilidade na indústria em todas as fases do seu ciclo de vida. A metodologia foi abordada considerando todas as etapas das normas internacionais da série ISO 14.040 (2006) e 14.044 (2006), explicando de forma detalhada todas as 4 etapas de sua aplicação: a definição de objetivo e escopo, análise de inventário (ICV), avaliação do impacto (AICV) e interpretação dos resultados. Também abordou a importância da utilização de um banco de dados de ICV, um método de AICV e um *software*, com o objetivo de tornar o estudo mais eficiente.

Para explicar os avanços científicos dos estudos de ACV do concreto foram utilizados 15 estudos. O objetivo foi caracterizar o cenário atual, dos quais é possível obter as seguintes conclusões:

- Existe uma grande necessidade de incorporar resíduos reciclados e subprodutos industriais no início do ciclo de vida do concreto, assim como é necessário fazer com que os resíduos gerados no fim de seu ciclo de vida se tornem insumos em um outro sistema produtivo ou no próprio sistema produtivo do concreto;
- Fica evidente a necessidade de mais estudos de ACV sobre o tratamento e a reutilização dos resíduos de construção com o objetivo de evitar o descarte desses resíduos na natureza e incorporá-los novamente no ciclo de vida de novos concretos;
- Atualmente é possível classificar os estudos de ACV do concreto em quatro limites de sistema que são: *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”), *“cradle-to-site”* (do berço ao site), *cradle-to-grave* (“do berço ao túmulo”) e *cradle-to-cradle* (“do berço ao berço”). E, embora a mais utilizada seja o *cradle-to-gate* a tendência é se avançar para a abordagem *cradle-to-cradle*;
- As pesquisas apontam para uma tendência de estudos que avaliam a utilização de resíduos e subprodutos industriais como escória de alto forno, cinzas volantes e outras adições minerais (cada vez menos clínquer e mais adições minerais) para produzir concreto, substituindo parte do cimento Portland. Isso porque o cimento é o maior responsável pelos impactos ambientais causados pelo ciclo de vida do concreto;
- Na ACV da utilização de resíduos reciclados como agregados na produção de concretos deve-se dar atenção considerável aos tipos de transporte praticados

no processo, bem como a distância da usina de beneficiamento de resíduo para garantir ganhos consideráveis no maior número de categorias de impactos ambientais possíveis;

- Três pontos devem ser considerados ao fazer a comparação da ACV de concretos comuns com concretos ecológicos: a escolha da unidade funcional, os dados do inventário e o método de AICV;
- Três pontos devem ser tratados com mais atenção em novas pesquisas: a ausência de uma avaliação holística dos impactos ambientais, a ausência de aplicações considerando variações regionais e tecnológicas e o negligenciamento de etapas;
- Dos métodos de AICV, banco de dados de ICV e softwares de ACV desenvolvidos fica evidente a predominância de países europeus e norte-americanos, com destaque para a Alemanha, a Holanda e os Estados Unidos confirmando o fato de que esses países estão à frente no desenvolvimento dos estudos de ACV;
- A metodologia ACV tem demonstrado ser uma ótima ferramenta para comparar cenários de diferentes dosagens de concretos na busca por dosagens ótimas de adições minerais alternativas visando o menor impacto ambiental;
- Embora as ferramentas de *software package*, como o *SimaPro*, sejam superiores às ferramentas *web tools*, o “*GreenConcrete LCA*” é um grande avanço nos estudos de ACV de concretos, pois, diferente das outras ferramentas disponíveis para estudo de ACV, ela é específica e adaptada para a fabricação de concreto;
- É evidente existir uma nova abordagem para avaliar a incorporação de resíduos e subprodutos industriais no concreto. Está claro também que, além das análises referentes ao desempenho técnico do material, deve-se dar relevância também ao seu ciclo de vida e desempenho ambiental, de modo a constatar se realmente será viável ambientalmente fazer a utilização daquele resíduo ou subproduto em uma escala completa do ciclo de vida do concreto.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA: MÉTODOS, PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS

***“O experimento científico e seus métodos são tentativas de se capturar o
pássaro da verdade.”***

Prof. João Luiz Calmon

3. METODOLOGIA DA PESQUISA: MÉTODOS, PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS

No capítulo anterior, a revisão bibliográfica foi apresentada como fundamentação teórica, para embasar cientificamente e tecnicamente esta dissertação. Ao analisar a revisão bibliográfica, identificou-se que é cientificamente importante avaliar o desempenho ambiental dos traços de CAAs verdes, utilizando uma abordagem de ACV.

Assim, este capítulo expõe a metodologia da pesquisa abrangendo as abordagens metodológicas referentes ao procedimento de coleta e seleção dos artigos estudados, o procedimento de definição do cenário para análise, a ferramenta computacional utilizada na pesquisa, o banco de dados utilizado, o procedimento de coleta dos dados complementares e o método de análise de impacto.

3.1. CRITÉRIOS PARA A COLETA DOS TRAÇOS ANALISADOS, DIVISÃO POR CLASSE DE RESISTÊNCIA E ESCOLHA DO CENÁRIO PARA SIMULAÇÃO DA ACV

Para realizar a coleta dos traços analisados no escopo desta pesquisa 4 premissas foram estabelecidas: (1) os traços de concreto deveriam estar contidos em artigos publicados em periódicos classificados com conceito Qualis Capes A1; (2) todos os artigos deveriam tratar da análise do desempenho técnico da incorporação de resíduos ou subprodutos industriais nos traços de CAAs; (3) todos os resíduos ou subprodutos industriais estudados deveriam ter viabilidade regional para poder ser utilizados no cenário escolhido; (4) os artigos deveriam conter a composição completa de cada traço estudado na unidade Kg/m^3 e também as informações de resistência à compressão aos 28 dias.

Após estabelecer as 4 premissas citadas acima procedeu-se a uma busca no portal de periódicos da CAPES, abrangendo os últimos dez anos de publicações. Quinze artigos foram selecionados conforme consta no Quadro 7.

Quadro 7 - Artigos selecionados para análise

NÚMERO DO ARTIGO NA DISSERTAÇÃO	AUTOR	ANO	ADIÇÕES, RESÍDUOS E SUBPRODUTOS UTILIZADOS NO TRAÇO	QUANTIDADE DE TRAÇOS NO ARTIGO
Artigo 1	ISMAIL e HASSAN	2016	MC, EGAF, CV e BRRP	33
Artigo 2	NGUYEN <i>et. al.</i>	2016	EGAF, CV e CVLFC	7
Artigo 3	SADRMOMTAZI <i>et. al.</i>	2016	SA, CV e RPET	10
Artigo 4	LIU e POON	2015	LV e CV	5
Artigo 5	GHERNOUTI <i>et. al.</i>	2015	FRSP e PC	13
Artigo 6	ZHAO <i>et. al.</i>	2015	EGAF e CV	7
Artigo 7	CELIK <i>et. al.</i>	2015	CV e PC	13
Artigo 8	PEREIRA-DE-OLIVEIRA <i>et. al.</i>	2014	CR e PC	4
Artigo 9	SUA-IAM e MAKUL	2013	RA	20
Artigo 10	HER YUNG <i>et. al.</i>	2013	EGAF, CV e BRRP	13
Artigo 11	GESOGLU <i>et. al.</i>	2012	AAE e CV	6
Artigo 12	ALI e AL-TERSAWY	2012	VR e SA	18
Artigo 13	LIU	2011	VR	6
Artigo 14	GRDIC <i>et. al.</i>	2010	CR e PC	3
Artigo 15	KOU e POON	2009	CV e VR	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos artigos selecionados foram extraídos 162 traços. Para realizar a ACV, os mesmos foram divididos em 3 classes de resistência baseando-se na NBR 8953:2009. A classe de resistência moderada, que vai de 20 até 50 MPa foi subdividida em duas classes, denominadas de Classe 1^a, com resistência de 20 até 35 MPa contemplando 77 traços, e de Classe 1B, com resistência de 35 MPa até 50 MPa contemplando 31 traços. A classe de alta resistência foi mantida sem subdivisões e denominada Classe 2, com resistência de 50 até 80 MPa contemplando 54 traços, conforme consta no Quadro 8.

Quadro 8 - Quantidade de traços por classe de resistência

CLASSE DE RESISTÊNCIA	RESISTÊNCIA	QUANTIDADE DE TRAÇOS NA CLASSE
Classe 1A	20 a 35 MPa	77
Classe 1B	35 a 50 MPa	31
Classe 2	50 a 80 MPa	54

Fonte: Elaborado pelo autor

No capítulo 4 desta dissertação, que abrange os resultados e discussões com a aplicação das etapas da ACV, ao se referir a algum traço de concreto será feita uma menção ao número do artigo exposto no Quadro 7 e o nome referente ao traço dado

pelo autor do artigo em questão. Para caracterizar melhor as amostras desta pesquisa, o Quadro C1, que segue no apêndice C desta dissertação, apresenta quais foram os ensaios de Reologia, Propriedades Mecânicas, Durabilidade e Microestrutura em cada um dos quinze artigos selecionados. Também expõe em quais periódicos foram publicados os artigos, o ano de publicação e o país de origem das pesquisas.

Na escolha do cenário para executar a ACV, o critério principal de seleção foi a disponibilidade e a qualidade de dados, portanto, foi utilizado-se um cenário bem definido e exposto na pesquisa de Celik *et al.* (2015). O cenário em questão foi montado tendo como referência uma fábrica de concreto na cidade de Berkeley, no estado da Califórnia-EUA, estabelecendo as distâncias e os modais de transporte que serão mantidas nessa pesquisa. O cenário será mais explicado no tópico 4.1.2 desta dissertação.

3.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL E BANCO DE DADOS

Para realizar a ACV utilizou-se o *software SimaPro Faculty* versão 8.2, pois é a ferramenta mais utilizada no meio acadêmico devido a sua flexibilidade na adaptação a vários objetivos, sua capacidade para promover a análise detalhada por meio de modelagem e armazenamento, sua capacidade de avaliação e seu grande número banco de dados atrelados com as fontes de diferentes regiões e indústrias. O software segue uma ACV baseada em processos e recentemente foi considerado uma ferramenta eficaz para estudos de ACV de concreto, entre outros disponíveis (SETO *et al.*, 2016).

O *SimaPro* é uma ferramenta flexível que possibilita a análise e o monitoramento ambiental de produtos, serviços e processos dentro da perspectiva de Pensamento do Ciclo de Vida. O software foi lançado em 1990 pela companhia holandesa *PréConsultants* e faz uso de vários bancos de dados consolidados do meio científico, principalmente europeus, como o *Ecoinvent* e o *ELCD (European Life Cycle Database)*. O *SimaPro* é um *software* desenvolvido para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e segue as recomendações das normas ISO 14040 (2006) e 14044 (2006). Por ser sistemático e transparente o *SimaPro* se tornou uma ferramenta bastante confiável

para muitas indústrias, empresas de consultoria e universidades em mais de 80 países ao redor do mundo (ACV BRASIL).

Embora a interação entre o *software* e o usuário seja complexa, o programa apresenta várias funcionalidades fundamentais para uma ACV, entre elas podemos citar:

- Permite a modificação do banco de dados e dos métodos de avaliação de impacto para serem adaptados a diferentes realidades;
- Apresenta mais de 20 métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida e mais de 9 bibliotecas de inventários, que contêm informações acerca de dezenas de milhares de processos e produtos.
- No banco de dados é possível criar novos processos ou modificar os já existentes em seus dados de entradas (*inputs*) de matérias-primas, energia, combustível, entre outros, bem como as saídas (*outputs*) dos processos, como emissões para o solo, ar, água e tratamento de resíduos;
- Permite a comparação entre diferentes processos;
- Os resultados são apresentados em gráficos e tabelas, de acordo com o método de impacto escolhido, o que facilita as análises.

O banco de dados utilizado neste estudo foi o *Ecoinvent* 3.2, por possuir a base de dados mais utilizada para ACV e também ser considerado pela comunidade científica o mais qualificado pela elevada transparência e abrangência, além de permitir ajustes para cenários alternativos.

A Associação *Ecoinvent* é uma organização sem fins lucrativos. Sua visão é a de auxiliar as pessoas em todo o mundo a fazer avaliações ambientais de alta qualidade com mais facilidade.

Os dados complementares necessários para esta pesquisa foram coletados de fontes conceituadas. O Google Maps serviu para determinar as distâncias de transporte e, para determinar composições de materiais e consumos energéticos de máquinas, foram utilizados artigos científicos e dados dos fabricantes dos equipamentos. Na seção 4.1 e 4.2 serão apresentadas todas as fontes de dados de distância de transporte, utilização de materiais e consumos de energia.

3.3. MÉTODO DE ANÁLISE DE IMPACTO “IMPACT 2002+”

O método de análise de impacto utilizado na ACV realizada nesta dissertação será o *IMPACT 2002+*. Para compreender melhor a necessidade e a importância da escolha de um método de análise de impacto é relevante rever o tópico 2.2.2.3.

O método *IMPACT 2002+* vem sendo muito utilizado pelas pesquisas científicas na área de análise ambiental de concretos (IGRAO *et al.*, 2014). Segundo Jolliet *et al.* (2003), o *IMPACTO 2002+* é a metodologia de avaliação de impacto do ciclo de vida que propõe uma implementação viável de uma abordagem que engloba categorias de impacto (*midpoints*) e categorias de danos (*endpoints*). Liga também, todos os tipos de resultados do inventário de ciclo de vida por meio de 15 categorias de impacto (toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre, acidificação aquático, eutrofização aquática, acidificação terrestre, ocupação do solo, aquecimento global, energia não renovável e extração mineral) para 4 categorias de danos (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, alterações climáticas e recursos). Na aplicação do método, o *midpoint* toxicidade humana divide-se em duas partes: (1) efeitos cancerígenos e (2) efeitos não-cancerígenos.

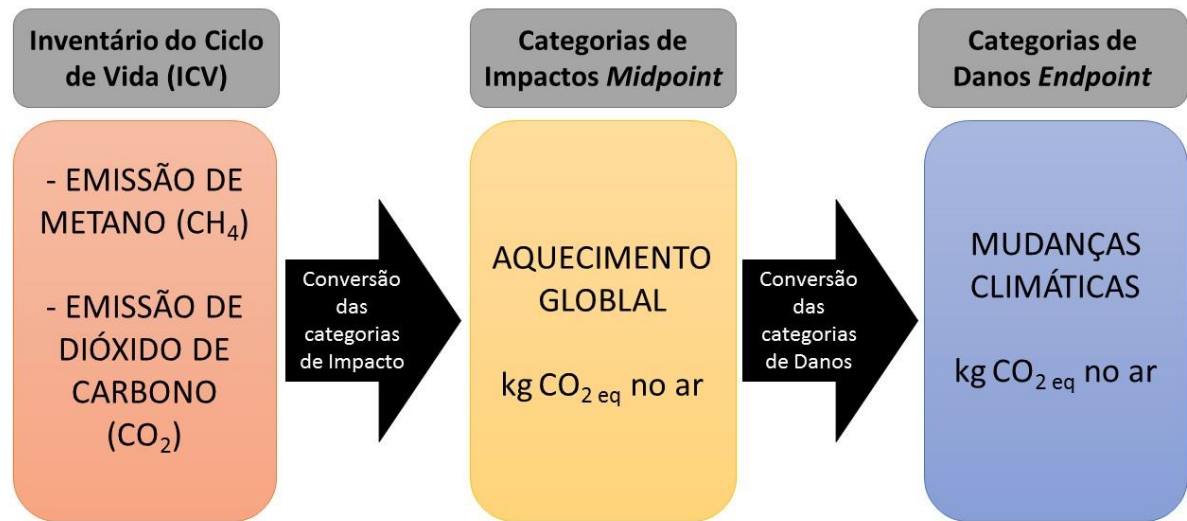
A Figura 5 representa o esquema geral do método *IMPACT 2002+* ligando as categorias de Impacto (*midpoints*) a suas respectivas categorias de danos (*endpoints*), sendo que uma seta constante simboliza o impacto convertido ao seu dano. E as vias de impacto incerto entre os níveis de *midpoint* e *endpoint* que não são modelados quantitativamente são representadas por setas pontilhadas.

Figura 5 – Esquema Geral do método IMPACT 2002+ ligando as categorias de Impacto (*midpoints*) a suas respectivas categorias de Danos (*endpoints*), com base em Joillet *et al.* (2003)



Fonte: Adaptado de Joillet *et. al.* (2003)

As categorias de impacto (*midpoints*) geralmente são quantificadas em relação à uma substância referência, por exemplo, para o aquecimento global é utilizado como unidade padrão Kg de CO₂ eq (Kg equivalente de dióxido de carbono na atmosfera), em que as outras substâncias contribuintes para esse impacto são transformadas em uma unidade equivalente. Esses impactos *midpoints* são transformados em categorias de danos *endpoints* por meio da multiplicação por fatores de caracterização de danos, que são determinados pelo método de impacto escolhido. Um exemplo da dinâmica do fluxo de um material do inventário ao dano pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Fluxo de CO₂ do inventário (emissão) ao dano ambiental

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 6, a emissão de gases do efeito estufa como o CO₂, que é quantificado na etapa de análise de inventário, causa um impacto de aquecimento global. Outras substâncias além do CO₂, que são gases do efeito estufa e também agravam o aquecimento global, são transformadas em uma quantidade equivalente de CO₂ por meio de um fator de equivalência, que varia de acordo com o potencial da mesma em relação à substância referência. Segundo Jolliet *et al.* (2003), os fatores de caracterização dos *midpoints* baseiam-se em princípios de equivalência, ou seja, a caracterização dos *midpoints* é expressa em kg equivalentes de uma substância, em comparação com uma substância de referência.

As substâncias de referência são geralmente as substâncias mais conhecidas por gerar aquele problema ambiental. Assim, quando esses problemas ambientais são combinados, eles são multiplicados por um fator de caracterização de danos e então transformados em um dano ambiental (*endpoint*). Os fatores de caracterização de danos variam entre os métodos de impacto, e mais detalhes referentes ao *IMPACT 2002+* podem ser estudados a fundo em Jolliet *et al.* (2003). No Quadro 9 encontram-se todos os *midpoints* e *endpoints*, com suas devidas unidades, que pertencem ao método *IMPACT 2002+*.

Quadro 9 – Categorias de impacto do método *Impact 2002+* e suas unidades

CATEGORIA DE MIDPOINT	SUBSTÂNCIA REFERÊNCIA DO MIDPOINT	CATEGORIA DE ENDPOINT	UNIDADE DO ENDPOINT
Toxicidade Humana (cancerígenos + não cancerígenos)	kg _{eq} cloroetileno no ar	Saúde humana	DALY
Efeitos respiratórios (inorgânicos)	kg _{eq} PM2.5 no ar (partículas inaláveis no ar cujo tamanho chega até 2,5 micrômetros)	Saúde humana	
Radiação Ionizante	Bq _{eq} carbono-14 no ar (radiocarbono é um isótopo radioativo natural do elemento carbono)	Saúde humana	
Depleção da camada de ozônio	kg _{eq} CFC-11 no ar	Saúde humana	
Oxidação Fotoquímica (respiratórios orgânicos para saúde humana)	kg _{eq} etileno no ar	Saúde humana	
		Qualidade do Ecossistema	-
Ecotoxicidade Aquática	kg _{eq} trietileno glicol na água	Qualidade do Ecossistema	PDF*m ² *ano
Ecotoxicidade Terrestre	kg _{eq} trietileno glicol na água	Qualidade do Ecossistema	
Acidificação/ Nutrição Terrestre	kg _{eq} SO ₂ no ar	Qualidade do Ecossistema	
Acidificação Aquática	kg _{eq} SO ₂ no ar	Qualidade do Ecossistema	<i>Unidade em desenvolvimento e ainda não definida pelo método</i>
Eutrofização Aquática	kg _{eq} PO ₄ ³⁻ na água (concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos)	Qualidade do Ecossistema	
Ocupação do solo	m ² _{eq} terra fértil-ano	Qualidade do Ecossistema	PDF*m ² *ano
Aquecimento global	kg _{eq} CO ₂ no ar	Mudanças climáticas	kg _{eq} CO ₂ no ar
Energia não-renovável	MJ total de energia não-renovável ou kg _{eq} de petróleo bruto	Recursos	MJ
Extração mineral	MJ de energia adicional ou kg _{eq} de ferro	Recursos	

Fonte: Adaptado de Jolliet *et. al.* (2003)

Na categoria de Danos ao Ecossistema utiliza-se o *Potentially Disappeared Fraction of Plant Species* (PDF), que considera o decréscimo de espécies baseado em emissões gasosas prejudiciais à biodiversidade aquática e terrestre, bem como devido aos efeitos locais e regionais de conversão de uma área natural em um complexo industrial. A unidade utilizada como indicador é o $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ano}$, expressando a perda de espécies em uma certa área durante um certo tempo.

Na categoria de Danos à Saúde Humana a unidade utilizada é DALY (*Disability Adjusted Life Years*), um conceito que compara o tempo de vida com a incapacidade (YLD: *Years Lived Disable*), e o tempo perdido devido à morte prematura (YLL: *Years of Live Lost*). Os fatores considerados referem-se à quantidade de indivíduos afetados, duração e gravidade dos problemas de saúde. Já na categoria de dano Recursos, o impacto é traduzido em MJ, quantificando o impacto em relação à energia necessária para extrações futuras de minerais e combustíveis fósseis. A extração de recursos minerais, como areia e argila, encontra-se na classe Ocupação do Solo (PRÉ CONSULTANTS, 2015; SILVA, 2005). Na categoria de impacto de mudanças climáticas a unidade utilizada é kg eq CO_2 , em que os gases que contribuem para o aquecimento global são traduzidos para CO_2 (o metano, por exemplo, é considerado 24,5 vezes mais danoso que o CO_2) (CARVALHO, 2002).

Por fim, segundo Jolliet *et al.* (2003), para facilitar a interpretação dos impactos, fatores de normalização podem ser aplicados nas classes de *midpoint* e *endpoint*, e determinados pela relação do impacto por unidade de emissão dividido por pessoa, por ano. A unidade comumente utilizada para os impactos normalizados é a pontuação única (Pt) que no caso do método IMPACT 2002+ representa a proporção do impacto ambiental total de 1 pessoa na Europa ocidental no período de 1 ano.

Em resumo, pode utiliza-se um fator de equivalência para apresentar os 15 *midpoints* em relação a uma substância referência; (2) na segunda etapa utiliza-se um fator de caracterização para converter as categorias de impactos (*midpoints*) em categorias de danos (*endpoints*); e, por fim, (3) na terceira etapa, para facilitar a interpretação dos resultados, utiliza-se um fator de normalização para os *midpoints* e *endpoints* serem apresentados em forma de pontuação única (Pt), facilitando comparações e análises.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

“Mais do que em qualquer outra época, a humanidade está numa encruzilhada. Um caminho leva ao desespero absoluto. O outro, à total extinção. Vamos rezar para que tenhamos a sabedoria de saber escolher.”

Woody Allen

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES: APLICAÇÃO DAS FASES I, II e III DA ACV

No capítulo anterior foram apresentados aspectos metodológicos para dar suporte ferramental no desenvolvimento da ACV aqui proposta. Assim, definiu-se o procedimento de coleta e a seleção dos artigos estudados, o procedimento de definição do cenário, a ferramenta computacional utilizada na pesquisa, o banco de dados utilizado, o procedimento de coleta dos dados complementares, e o método de análise de impacto.

O método *IMPACT 2002+* foi detalhadamente explicado para facilitar a compreensão das análises e dos resultados.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação das 3 primeiras fases da ACV para auxiliar no processo de escolha dos melhores concretos ecológicos entre as amostras coletadas e separadas em suas respectivas classes de resistência. Inicialmente será apresentada a fase I e II, que delimitam a abordagem da pesquisa. Posteriormente será apresentada a fase III, explorando a avaliação de impactos dos traços analisados em 6 frentes de análise: (1) materiais, energia e transporte; (2) classe 1A de resistência; (3) classe 1B de resistência; (4) classe 2 de resistência; (5) comparação entre as classes de resistência e (6) análise de sensibilidade dos dados. A fase IV, que trata da interpretação dos resultados, será discutida no capítulo 5.

Durante a análise e a apresentação dos resultados serão selecionados alguns traços para representar cada classe de resistência em nível de análise, porém a composição e os resultados individuais das ACV's de cada traço encontram-se no apêndice A e apêndice B, respectivamente.

4.1. FASE 1: DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

Nesta etapa da ACV tem-se como objetivo expor as características básicas delimitadoras do estudo informando a aplicação pretendida e o público-alvo. Segundo a norma ISO 14.041 (2006), na definição de objetivos e do escopo devem ser especificados a definição da unidade funcional, o processo do produto estudado, as fronteiras do sistema, os procedimentos de alocação das entradas e saídas, os tipos

de impactos avaliados, os requisitos da qualidade e a fonte dos dados coletados, conforme detalhado no item 2.2.2.1 desta dissertação.

4.1.1. OBJETIVOS, UNIDADE FUNCIONAL E LIMITES DO SISTEMA

O objetivo do estudo desta dissertação consiste no desenvolvimento de uma ACV comparativa para analisar 162 traços de Concretos Autoadensáveis (CAA) ecológicos, separados em 3 classes de resistência, com altas proporções de incorporação de resíduos e subprodutos industriais em um cenário na cidade de Berkeley, Califórnia/EUA. A pesquisa pretende apontar quais traços apresentam o melhor desempenho ambiental no cenário proposto. Os traços foram extraídos de 15 artigos científicos que comprovaram a viabilidade técnica dos concretos analisados.

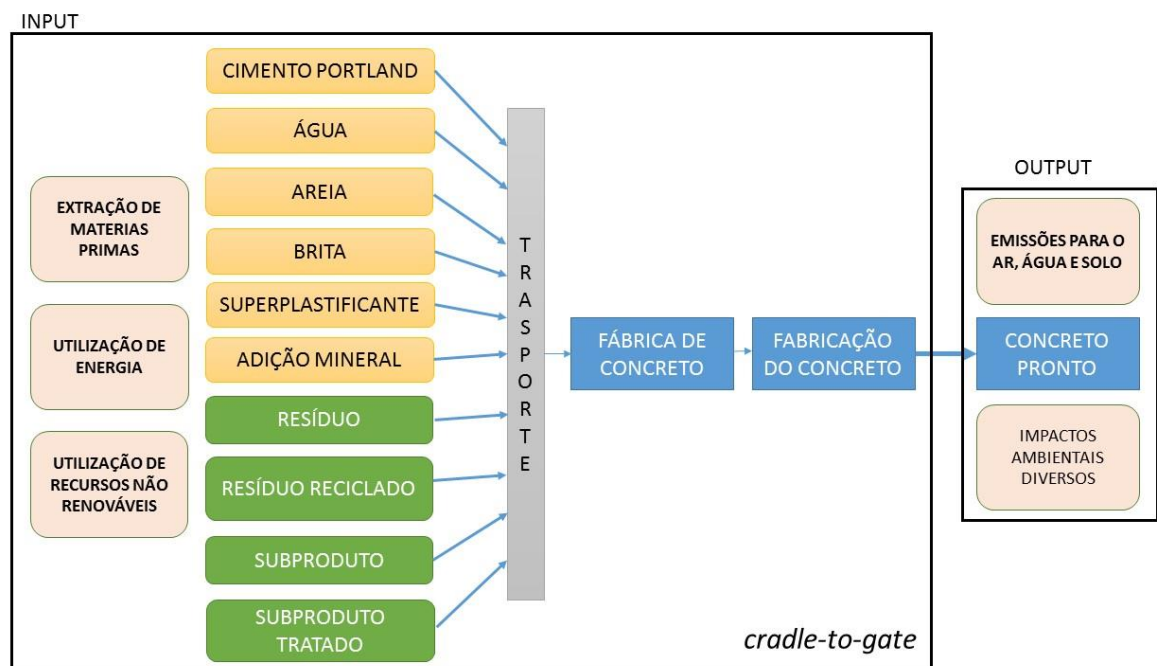
Com os resultados obtidos, os traços de CAAs foram ranqueados do melhor desempenho ambiental para o pior. Assim, a ACV foi utilizada como uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão para escolher uma mistura de concreto com o maior desempenho ambiental dentro de um cenário específico em 3 classes de resistência diferentes. O público-alvo para esta ACV é a comunidade técnica e científica que atua na linha de pesquisa sobre construção sustentável. A ACV foi realizada utilizando o software *SimaPro 8.2*, banco de dados *Ecoinvent 3.2* e o método de análise de impacto *IMPACT 2002+*.

A unidade funcional do estudo é de 1 m³ de concreto produzido. E, os tipos de impactos avaliados irão seguir as definições do método *IMPACT 2002+* com 15 categorias de impacto (toxicidade humana: cancerígenos, toxicidade humana: não-cancerígenos, efeitos respiratórios, radiação, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre, acidificação aquático, eutrofização aquática, acidificação terrestre, ocupação do solo, aquecimento global, energia não renovável e extração mineral) e 4 categorias de danos (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, alterações climáticas e recursos).

A fronteira do sistema é denominada *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”) (Figura 7). Os insumos Cimento, Água, Areia, Brita, Superplastificantes foram alocados como produtos, logo, receberam todos os impactos ambientais desde as extrações das matérias-primas até a sua geração e posterior o transporte para a fábrica de concreto. No caso dos resíduos não foram atribuídos impactos anteriores a sua geração. Assim,

somente os impactos do transporte para fábrica de concreto foram atribuídos. Com relação aos resíduos reciclados, somente o impacto do processo de reciclagem e o transporte até a fábrica de concreto foram atribuídos, excluindo os impactos referentes a coleta desses resíduos no seu destino final. No caso dos subprodutos, eles podem trazer uma parte do impacto advindo de processos anteriores a sua geração, dependendo da fonte dos dados, somando ao transporte até a fábrica de concreto. Os subprodutos tratados podem trazer uma parte do impacto advindo de processos anteriores a sua geração, dependendo da fonte dos dados, somando ao impacto do tratamento aplicado ao subproduto e transporte. Por fim, é feita a mistura do concreto na fábrica utilizando a proporção dos insumos de acordo com um traço específico, fechando a fronteira do sistema desta pesquisa.

Figura 7 - Fronteiras do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os 162 traços de concretos analisados estão expostos no apêndice A desta dissertação em 15 quadros referentes à cada artigo analisado com suas composições de materiais completas em Kg/m³, massa total da mistura e resistência à compressão aos 28 dias. Os materiais que compõem os traços de modo geral são: Cimento Portland EUA TIPO A (CPA), Cimento Portland EUA TIPO B (CPB), Cimento Portland EUA Tipo C (CPC), Areia (Ar), Brita (Br), Água (Ag), Superplastificante (SP), Agregado Artificial de Escória (AAE), Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP), Cinzas

Volantes (CV), Cinzas Volantes de Leito Fluidizado Circulante (CVLFC), Concreto Reciclado (CR), Escória Granulada de Alto Forno (EGAF), Fibra de Resíduo de Saco Plástico (FRSP), Lama Vermelha do Processo Bayer (LV), Metacaulim (MC), Pó de Calcário (PC), Resíduo de Alumina (RA), Resíduo de Polietileno Tereftalato (RPET), Sílica Ativa (SA), Vidro Reciclado (VR). Os cimentos utilizados na pesquisa foram divididos em 3 tipos de forma a serem compatíveis com os cimentos utilizados nos artigos coletados. A composição de cada um deles é apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 - Tipos de cimento utilizados na ACV

CIMENTO	COMPOSIÇÃO
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO A	95% de Clínquer
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO B	6-20% de substituição do Clínquer
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO C	21-35% de substituição do Clínquer

Fonte: Elaborado pelo autor

Para concluir a fase I da ACV, no próximo tópico será exposto o cenário para a simulação e na sequência, na fase II, será dada uma ênfase maior aos requisitos de qualidade dos dados.

4.1.2. CENÁRIO PARA SIMULAÇÃO

O cenário escolhido para a simulação considera uma fábrica de concreto localizada na cidade de Berkeley, no Estado da Califórnia/EUA. Esse cenário foi extraído da pesquisa de Celik *et al.* (2015), que também faz uma análise ambiental de traços de concreto. Vale ressaltar que seus traços também foram acrescentados nesta pesquisa. Entretanto, a pesquisa de Celik *et al.* (2015) não continha informações de distâncias de transporte para todos os materiais analisados neste estudo. Assim, foi necessário coletar dados referentes aos locais onde existiam os outros materiais necessários para compor os traços dos 15 artigos analisados.

Segundo Celik *et al.* (2015), as cinzas volantes foram obtidas em uma fábrica denominada *Jim Bridger*, localizada em Wyoming, e transportadas por via férrea. A brita é provém de uma pedreira localizada na Colúmbia Britânica, Canadá, transportada por barcaça até um porto próximo e, logo em seguida, é transportada por

via rodoviária até Berkeley. O pó de calcário, a areia e o cimento são fornecidos por produtores locais próximos ao cenário de simulação e são transportados por via rodoviária. A água utilizada é conduzida até a fábrica pela rede local de água tratada. O Superplastificante é fornecido por uma fábrica de produtos químicos localizada em *Wyoming* e foi trazido por via rodoviária até o cenário de análise.

O cenário das adições, resíduos e subprodutos que não integram o trabalho de Celik *et al.* (2015) foram definidos ao localizar as fábricas mais próximas que tinham disponibilidade dos materiais em questão.

Para a borracha reciclada de resíduo de pneu, o concreto reciclado, a fibra de resíduo de saco plástico, Resíduo de Polietileno Tereftalato e o Vidro Reciclado foram considerados os fornecimentos da empresa *Recology*, localizada em San Francisco, e seu transporte foi por via rodoviária. A *Recology* é uma empresa que trabalha com a reciclagem e a destinação de vários resíduos urbanos na cidade de *San Francisco*, sendo um modelo mundial nessa prática.

Para as Cinzas Volantes de Leito Fluidizado Circulante considerou-se o fornecimento pela usina termoelétrica a carvão denominada *Spurlock Power Station - Kentucky Power Cooperatives*, localizada em *Maysville*, e seu transporte foi por via férrea. No caso da Escória Granulada de Alto Forno e do Agregado Artificial de Escória considerou-se o fornecimento da metalúrgica *Lafarge North America Inc.*, localizada em *Seattle*, e foram transportados por via férrea. O agregado artificial de escória é um material experimental, desse modo, ponderou-se que sua fabricação seria possível dentro do cenário implementado.

O resíduo de Lama Vermelha derivado do processo Bayer para produção de alumina foi fornecido pela empresa *Alcoa*, localizada em *Point Comfort*, e seu transporte foi realizado por via férrea. A *Alcoa* possui várias unidades espalhadas pelo Estado do Texas, porém apenas a unidade de *Point Comfort* fabrica alumina e gera uma grande quantidade de lama vermelha. No caso do metacaulim o fornecimento ocorreu pela empresa *IMERYS*, localizada em *Sandersville*, que apresenta uma excelente rede logística para o escoamento de seus produtos, e seu transporte foi realizado por via férrea.

Para o resíduo de Alumina o fornecimento foi pela empresa *Picon*, localizada em *San Pablo*, e o transporte utilizado foi por via rodoviária. A empresa atua no ramo de jateamento abrasivos e gera muito resíduo de abrasivos de alumina e também fazem a coleta de tais resíduos para reciclagem. Por fim, para a sílica ativa o fornecimento foi pela empresa *CC Metals and Alloys*, localizada em *Calvert City*, e seu transporte foi por via férrea. A empresa foi escolhida integrar a associação da sílica ativa criada para auxiliar os produtores de sílica ativa na promoção do seu uso em concreto. O Quadro 11 expõe informações detalhadas sobre o cenário de simulação desta pesquisa.

Quadro 11 - Cenário para simulação

Cenário para simulação - Berkeley, Califórnia, EUA				
Material	(Fábrica), Cidade, Estado e País de Origem	Distância da Fábrica (Km)	Tipo de Transporte	Fonte das Distâncias
Cimento Portland Tipo A (CPA)	(Produtor Local) Califórnia, EUA	60	Caminhão	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Cimento Portland Tipo B (CPB)	(Produtor Local) Califórnia, EUA	60	Caminhão	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Cimento Portland Tipo C (CPC)	(Produtor Local) Califórnia, EUA	60	Caminhão	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Areia (Ar)	(Produtor Local) Califórnia, EUA	50	Caminhão	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Brita (Br)	(Pedreira) Colúmbia Britânica, CANADÁ	1000	Barcaça	CELIK <i>et al.</i> (2015)
		10	Caminhão	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Água (Ag)	(Rede Local) Califórnia, EUA	-	-	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Superplastificante (SP)	(Fábrica) Wyoming, EUA	1000	Caminhão	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Agregado Artificial de Escória (AAE)	(Lafarge North America Inc.) Seattle, Washington, EUA	1300	Via Férrea	Google Maps
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP)	(Recology) San Francisco, Califórnia, EUA	30	Caminhão	Google Maps

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 11 (continuação) - Cenário para simulação

Cenário para simulação - Berkeley, Califórnia, EUA				
Material	(Fábrica), Cidade, Estado e País de Origem	Distância da Fábrica (Km)	Tipo de Transporte	Fonte das Distâncias
Cinzas Volantes (CV)	(Jim Bridger Power Plant) Point of Rocks, Wyoming, EUA	1000	Via Férrea	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Cinzas Volantes de Leito Fluidizado Circulante (CVLFC)	(Unit 3 of East Kentucky Power Cooperatives - Spurlock Power Station) Maysville, Kentucky, EUA	3500	Via Férrea	Google Maps
Concreto Reciclado (CR)	(Recology) San Francisco, Califórnia, EUA	30	Caminhão	Google Maps
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF)	(Lafarge North America Inc.) Seattle, Washington, EUA	1300	Via Férrea	Google Maps
Fibra de Resíduo de Saco Plástico (FRSP)	(Recology) San Francisco, Califórnia, EUA	30	Caminhão	Google Maps
Lama Vermelha do Processo Bayer (LV)	(Alcoa) Point Comfort, Texas, EUA	3150	Via Férrea	Google Maps
Metacaulim (MC)	(IMERYS) Sandersville, Georgia, EUA	4000	Via Férrea	Google Maps
Pó de Calcário (PC)	(Produtor Local) Califórnia, EUA	130	Caminhão	CELIK <i>et al.</i> (2015)
Resíduo de Alumina (RA)	(Picon) San Pablo, Califórnia, EUA	16	Caminhão	Google Maps
Resíduo de Polietileno Tereftalato (RPET)	(Recology) San Francisco, Califórnia, EUA	30	Caminhão	Google Maps
Sílica Ativa (SA)	(CC Metals and Alloys) Calvert City, Kentucky, EUA	3000	Via Férrea	Google Maps
Vidro Reciclado (VR)	(Recology) San Francisco, Califórnia, EUA	30	Caminhão	Google Maps

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2. FASE 2: ANÁLISE DE INVENTÁRIO (ICV)

A análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) envolve a compilação e quantificação dos fluxos de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*). Esta dissertação inclui os dados pertinentes ao sistema *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”) da produção de concreto de acordo com a Figura 7 e utiliza o banco de dados *Ecoinvent* 3.2 para quantificar os

fluxos de entrada e saída. Abaixo serão apresentadas as informações referentes aos dados de entrada do *Software SimaPro*.

4.2.1. ALOCAÇÃO DOS MATERIAIS E MONTAGEM DOS TRAÇOS NO SIMAPRO

Os materiais utilizados nos traços de concretos desta pesquisa foram alocados seguindo 5 critérios: (1) material utilizado como produto; (2) material utilizado como resíduo; (3) material utilizado como resíduo reciclado; (4) material utilizado como subproduto; (5) material utilizado como subproduto tratado. O Quadro 12 informa o a abrangência de impactos ambientais referente aos 5 critérios de alocação utilizados.

Quadro 12 - Critérios de alocação

ALOCAÇÃO	ABRANGÊNCIA
PRODUTO	Resultado final de um processo de fabricação. Absorve todo impacto ambiental dos processos até a sua geração.
RESÍDUO	Material que sobra após um processo produtivo. Não é atribuído impacto ambiental anterior à geração do resíduo.
RESÍDUO REICLADO	Resíduo que recebeu algum tipo de reciclagem para ser utilizado em um novo processo produtivo. Somente o impacto do processo de reciclagem é atribuído.
SUBPRODUTO	Produto secundário resultante de um processo de fabricação. Pode trazer impacto ambiental advindo de processos anteriores a sua geração.
SUBPRODUTO TRATADO	Subproduto que recebeu algum tipo de tratamento antes de sua utilização (Exemplo: tratamento térmico)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após determinar os critérios de alocação foi possível realizar a montagem de cada material no *SimaPro*. Os materiais foram montados em módulos distintos contendo as particularidades referentes ao consumo de material, consumo de transporte e consumo de energia para produção de 1 kg do material, levando em consideração o critério de alocação de cada um. Os dados de consumo de material e energia que não existiam no *Ecoinvent 3.2* foram localizados no site de fabricantes de máquinas e artigos que já analisaram o material em questão. O Quadro 13 expõe a montagem de cada material, evidenciando o critério de alocação e a fonte dos dados.

Quadro 13 - Montagem dos materiais no *SimaPro*

MATERIAL	ALOCAÇÃO	MONTAGEM DE 1 Kg DO MATERIAL NO SIMAPRO	FONTE DOS DADOS DE MATERIAIS	FONTE DOS DADOS DE TRANSPORTE	FONTE DOS DADOS ADICIONAIS DE CONSUMO DE MATERIAL E ENERGIA
AGREGADO ARTIFICIAL DE ESCÓRIA (AAE)	Subproduto Tratado	0,90 Kg de Escória + 0,10 kg de Cimento Americano TIPO A + 0,22 kg de água + 0,0016 KWh de Energia elétrica para um Pelotizador + 1300 kg Km de transporte por via férrea	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	Yung et al. (2013)
ÁGUA (Ag)	Produto	1 Kg Água	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
AREIA (Ar)	Produto	1 Kg Areia + 50 Kg Km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
BORRACHA RECICLADA DE RESÍDUO DE PNEU (BRRP)	Resíduo Reciclado	0,24 KWh de Energia Elétrica para Máquina de Reciclar Pneu + 30 kg Km de transporte de Caminhão	-	Ecoinvent 3.2	<i>WhirlSton - Small Scale Tire Recycling Line</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 13 (continuação) - Montagem dos materiais no *SimaPro*.

MATERIAL	ALOCÇÃO	MONTAGEM DE 1 Kg DO MATERIAL NO SIMAPRO	FONTE DOS DADOS DE MATERIAIS	FONTE DOS DADOS DE TRANSPORTE	FONTE DOS DADOS ADICIONAIS DE CONSUMO DE MATERIAL E ENERGIA
BRITA (Br)	Produto	1 kg de Brita + 1000 Kg Km de transporte de Barcaça + 10 kg km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO A (CPA)	Produto	1 kg de Cimento Americano TIPO A + 60 kg Km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO B (CPB)	Produto	1 kg de Cimento Americano TIPO B + 60 kg Km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO C (CPC)	Produto	1 kg de Cimento Americano TIPO C + 60 kg Km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
CINZAS VOLANTES (CV)	Subproduto Tratado	0,67 MJ de calor fornecido pela queima de gás natural + 1000 Kg Km de transporte por via Férrea	-	Ecoinvent 3.2	Chen et al. (2010) e Celik et al. (2015)
CINZAS VOLANTES DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE (CVLFC)	Subproduto Tratado	3500 Kg Km de transporte por via Férrea + 0,67 MJ de calor fornecido pela queima de gás natural	-	Ecoinvent 3.2	Chen et al. (2010) e Celik et al. (2015)

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 13 (continuação) - Montagem dos materiais no *SimaPro*

MATERIAL	ALOCAÇÃO	MONTAGEM DE 1 Kg DO MATERIAL NO SIMAPRO	FONTE DOS DADOS DE MATERIAIS	FONTE DOS DADOS DE TRANSPORTE	FONTE DOS DADOS ADICIONAIS DE CONSUMO DE MATERIAL E ENERGIA
CONCRETO RECICLADO (CR)	Resíduo Reciclado	1 kg de concreto reciclado + 30 kg Km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO (EGAF)	Subproduto	1 Kg de Escória Granulada de Alto Forno + 1300 Kg Km de transporte por via Férrea	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
FIBRA DE RESÍDUO DE SACO PLÁSTICO (FRSP)	Resíduo Reciclado	0,55 KWh de energia Elétrica para uma máquina que transforma o resíduo de saco plástico em fibra de saco plástico + 30 Kg Km de transporte de Caminhão	-	Ecoinvent 3.2	<i>Wenzhou Hero International Trade Co.,Ltd.</i>
LAMA VERMELHA DO PROCESSO BAYER (LV)	Resíduo	3150 Kg Km de transporte por via Férrea	-	Ecoinvent 3.2	-
METACAU LIM (MC)	Produto	1,16 Kg de Caulim + 2,25 MJ de calor fornecido pela queima de gás natural para Calcinação + 0,0058 KWh de energia elétrica de equipamentos + 4000 Kg Km de transporte por via Férrea	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	Heath <i>et al.</i> (2014) e Habert <i>et al.</i> (2011)
PÓ DE CALCÁRIO (PC)	Produto	1 Kg de Pó de Calcário + 130 Kg Km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 13 (continuação) - Montagem dos materiais no *SimaPro*

MATERIAL	ALOCÇÃO	MONTAGEM DE 1 Kg DO MATERIAL NO SIMAPRO	FONTE DOS DADOS DE MATERIAIS	FONTE DOS DADOS DE TRANSPORTE	FONTE DOS DADOS ADICIONAIS DE CONSUMO DE MATERIAL E ENERGIA
RESÍDUO DE ALUMINA (RA)	Resíduo	16 Kg Km de transporte de Caminhão	-	Ecoinvent 3.2	-
RESÍDUO DE POLIETILENO TEREFALATO (RPET)	Resíduo Reciclado	0,085 KWh de energia elétrica para um Moinho de Trituração + 30 Kg Km de transporte de Caminhão	-	Ecoinvent 3.2	<i>PROSINO - Plastic Granulator</i>
SÍLICA ATIVA (SA)	Subproduto	1 Kg de Sílica Ativa + 3000 Kg Km de transporte por via Férrea	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
SUPERPLASTIFICANTE G3 (SP)	Produto	1 Kg de Policarboxilato com 40% de Substância Ativa + 1000 Kg Km de transporte de Caminhão	Ecoinvent 3.2	Ecoinvent 3.2	-
VIDRO RECICLADO (VR)	Resíduo Reciclado	0,0016 KWh de energia Elétrica para um Triturador de Vidro + 30 Kg Km de transporte de Caminhão	-	Ecoinvent 3.2	<i>Andela Products Glass Pulverizer</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

Também foi feita a montagem do consumo energético pertinente aos processos para produzir 1 m³ de concreto na fábrica, conforme consta no Quadro 14. Os dados imputados referem-se ao consumo de energia de uma fábrica de concreto nos Estados Unidos e abrangem a movimentação de máquinas, queima de combustíveis e energia elétrica para produzir 1 m³ de concreto.

Quadro 14 - Consumo de energia na fábrica

ENERGIA CONSUMIDA NA FÁBRICA PARA PRODUZIR 1 m ³ DE CONCRETO	ALOCÇÃO	MONTAGEM DE 1 m ³ DO MATERIAL NO SIMAPRO	FONTE DOS DADOS DE MATERIAIS
	Energia	4,114 KWh de energia Elétrica + 15,643 MJ de queima de Diesel + 10,632 de calor proveniente da queima de gás natural (Os dados são de origem da matriz energética dos EUA para produção de concreto)	Ecoinvent 3.2

Fonte: Elaborado pelo autor

Com todos os módulos de materiais e o módulo de energia montados no banco de processos do *SimaPro* foi possível montar a composição de cada um dos 162 traços de concretos analisados, levando em consideração a proporção de materiais, em kg/m³, de cada traço mais o módulo de consumo de energia na fábrica, conforme exemplo do Quadro 15.

Quadro 15 - Exemplo da montagem do traço (Artigo 07) CFL 55-30-15 no *SimaPro*

(Artigo 07) CFL 55-30-15		
MÓDULO DE MATERIAL E ENERGIA	UNIDADE	QUANTIDADE
Cimento Portland EUA TIPO A	kg	248,00
Cinzas Volantes	kg	135,00
Pó de Calcário	kg	68,00
Água	kg	157,85
Areia	kg	902,00
Brita	kg	902,00
Superplastificante	kg	5,14
Energia consumida na fábrica	m ³	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a montagem de todos os traços foi possível executar a simulação para comparar o desempenho ambiental dos materiais e dos traços de acordo com o método *IMPACT 2002+*. O comentário das análises encontra-se no tópico 4.3, que trata da fase 3 do método de ACV referente à avaliação dos impactos.

4.3. FASE 3: AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Nesta etapa tem-se como objetivo compreender e avaliar os impactos ambientais com base na análise dos dados de inventário (seção 4.2). Esta etapa é a mais importante e a mais crítica do estudo, pois aqui são gerados os resultados.

Os dados foram agrupados em categorias de danos (*midpoints*) e categorias de impacto (*endpoints*) em unidades absolutas e pontuação única (mPt), de acordo com o método de análise de impacto IMPACT 2002+ detalhado na seção 3.3. Os resultados serão expostos em forma de tabelas e gráficos para comparar o desempenho ambiental de cada traço.

Para apresentar os resultados, na abordagem *midpoint* serão enfatizadas as categorias de danos Efeitos Respiratórios Inorgânicos, Aquecimento Global e Energia não renovável, pois juntas representam mais de 90% do impacto total dos traços de concreto. Porém, os dados da ACV completa com todos os *midpoints* referentes ao método escolhido se encontram no apêndice B deste trabalho. Após analisar os 3 principais *midpoints* será demonstrada uma análise complementar da influência do cimento e das incorporações de resíduos e subprodutos industriais nas resistências, pois o cenário pretendido com a incorporação de tais produtos é a melhoria do desempenho ambiental e das funções técnicas.

Na abordagem *endpoint* serão enfatizadas todas as categorias de danos, e também foi incluído nas análises o indicador de “Intensidade de Impacto”, pois, segundo Celik *et al.* (2015), esse indicador permite verificar a contribuição da incorporação do resíduo ou do subproduto considerando a sua influência no desempenho da resistência à compressão. A intensidade de impacto é um bom indicador para verificar o desempenho ambiental do concreto e nesta pesquisa será o resultado da pontuação única dividida pela resistência à compressão aos 28 dias. Quanto menor for o valor da intensidade de impacto mais eco-eficiente será o traço de concreto.

Na seção 4.3.1 serão apresentadas as análises individuais de cada componente dos traços analisados, abordando materiais, energia e transporte. Essa análise secundária se mostrou necessária para melhorar a compreensão do impacto total de cada traço, pois o impacto total de cada traço nada mais é do que a soma dos impactos gerados pelas componentes Materiais, Energia e Transporte. Nas seções 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4 serão apresentadas as análises dos traços divididos pelas classes de resistência 1A, 1B e 2, respectivamente, nas quais serão definidos os melhores e os piores desempenhos ambientais em suas devidas classes de resistência. Na seção 4.3.5 será apresentada uma análise comparativa entre os melhores e os piores traços de cada classe. Por fim, na seção 4.3.6 será apresentada uma análise de sensibilidade,

que atualmente está sendo muito requisitada pelos revisores dos principais periódicos mundiais que publicam estudos de ACV, para estimar os efeitos sobre as incertezas e reforçar a fiabilidade dos resultados obtidos.

Vale lembrar que a ACV foi utilizada neste estudo como método auxiliar para a tomada de decisão em relação a qual dos traços analisados seria o de melhor desempenho ambiental no cenário proposto, portanto, todas as análises são comparativas.

4.3.1. MATERIAIS, ENERGIA E TRANSPORTE

Em uma ACV *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”), na fabricação do concreto os componentes do impacto total de um traço são: Materiais, Transporte e Energia consumida na fábrica. Desse modo, a análise individual de cada um desses componentes é fundamental para estudar a sua influência no contexto geral.

Ao iniciar as análises, no Quadro 16 encontra-se os 3 principais indicadores de *midpoints* com a pontuação única total para o consumo médio de cada material ordenados do menos poluidor para o mais poluidor em relação à pontuação única. Já a Figura 8 expõe a caracterização dos mesmos.

Quadro 16 - Resultado dos 3 principais indicadores de *midpoints* e pontuação única total para o consumo médio de cada material

MATERIAL	Efeitos respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não Renovável (MJ Primary)	Pontuação Única (mPt)	Média de consumo
ÁGUA (Ag)	0,0001	0,0542	0,7661	0,0245	186 kg
VIDRO RECICLADO (VR)	0,0013	0,7741	12,7740	0,3404	166 kg
RESÍDUO DE ALUMINA (RA)	0,0014	1,0647	17,7054	0,4434	510 kg
FIBRA DE RESÍDUO DE SACO PLÁSTICO (FRSP)	0,0033	1,0455	16,5657	0,5850	4 kg
PÓ DE CALCÁRIO (PC)	0,0067	2,4431	39,9032	1,3635	118 kg
RESÍDUO DE POLIETILENO TEREFTALATO (RPET)	0,0096	3,1466	50,0452	1,7265	72 kg
ENERGIA CONSUMIDA NA FÁBRICA DE CONCRETO	0,0103	3,6968	59,0701	1,8910	1 m ³
SUPERPLASTIFICANTE G3 (SP)	0,0068	6,3983	151,3156	2,5724	5 kg

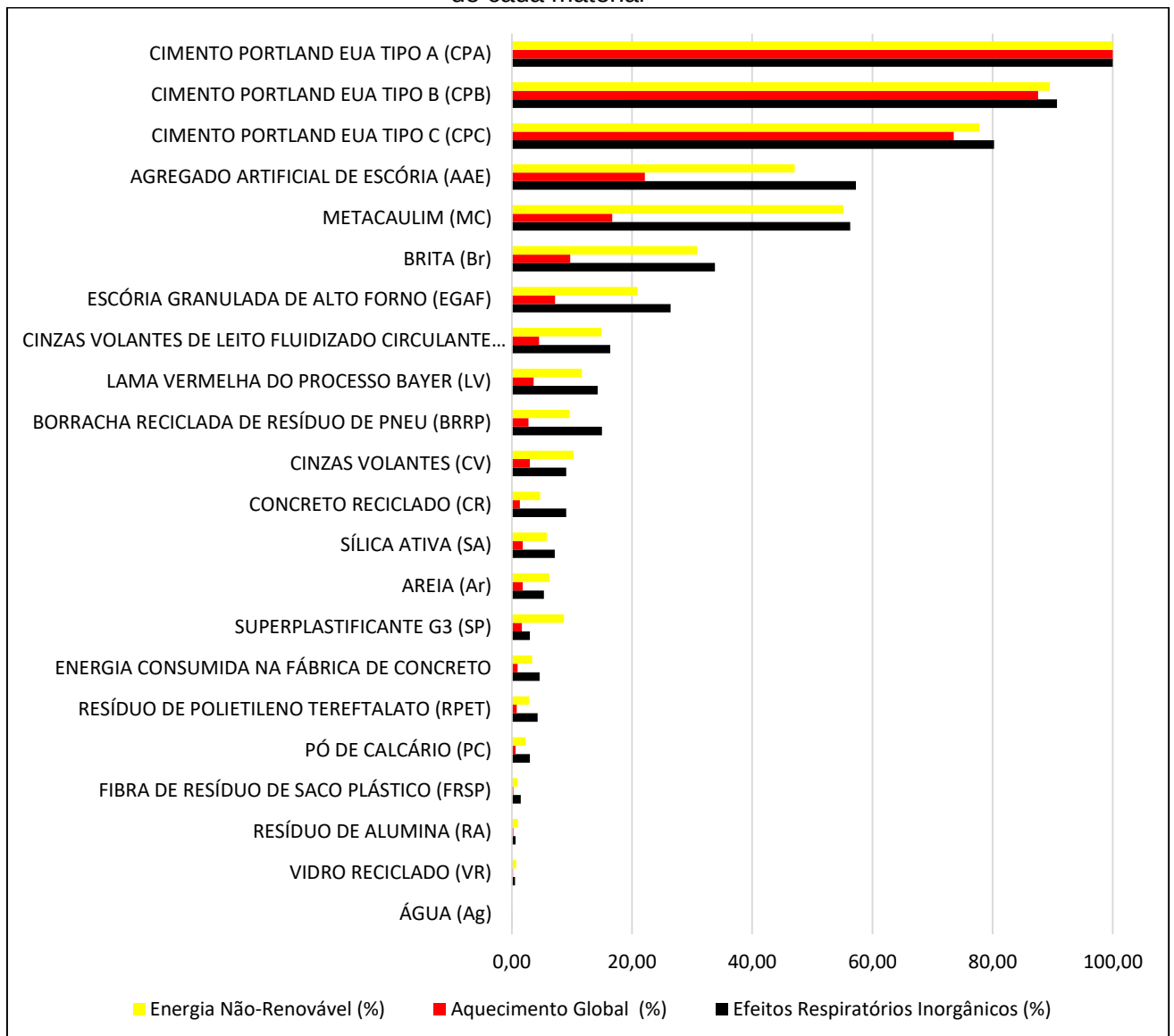
Fonte: Elaborado pelo Autor

Quadro 16 (continuação) - Resultado dos 3 principais indicadores de *midpoints* e pontuação única total para o consumo médio de cada material

MATERIAL	Efeitos respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não Renovável (MJ Primary)	Pontuação Única (mPt)	Média de consumo
AREIA (Ar)	0,0119	6,9588	108,7039	3,0026	660 kg
SÍLICA ATIVA (SA)	0,0159	7,0015	101,8272	3,1364	41 kg
CONCRETO RECICLADO (CR)	0,0202	5,1088	82,0981	3,2771	509 kg
CINZAS VOLANTES (CV)	0,0202	11,5826	179,3573	4,6962	147 kg
BORRACHA RECICLADA DE RESÍDUO DE PNEU (BRRP)	0,0334	10,5796	167,7908	5,8908	91 kg
LAMA VERMELHA DO PROCESSO BAYER (LV)	0,0318	13,9859	203,4061	6,2651	78 kg
CINZAS VOLANTES DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE (CVLFC)	0,0364	17,4669	259,8924	7,5599	79 kg
ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO (EGAF)	0,0587	27,6969	364,1610	12,3396	208 kg
BRITA (Br)	0,0752	37,3992	537,6206	15,6292	744 kg
METACaulim (MC)	0,1253	64,1621	961,3841	26,9521	110 kg
AGREGADO ARTIFICIAL DE ESCÓRIA (AAE)	0,1274	84,9390	820,0493	29,3379	392 kg
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO C (CPC)	0,1785	282,2459	1354,6953	58,7894	408 kg
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO B (CPB)	0,2018	336,1326	1559,6656	68,3910	408 kg
CIMENTO PORTLAND EUA TIPO A (CPA)	0,2224	383,8665	1742,3245	76,9005	408 kg

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 8 - Caracterização dos 3 principais indicadores de *midpoints* para o consumo médio de cada material



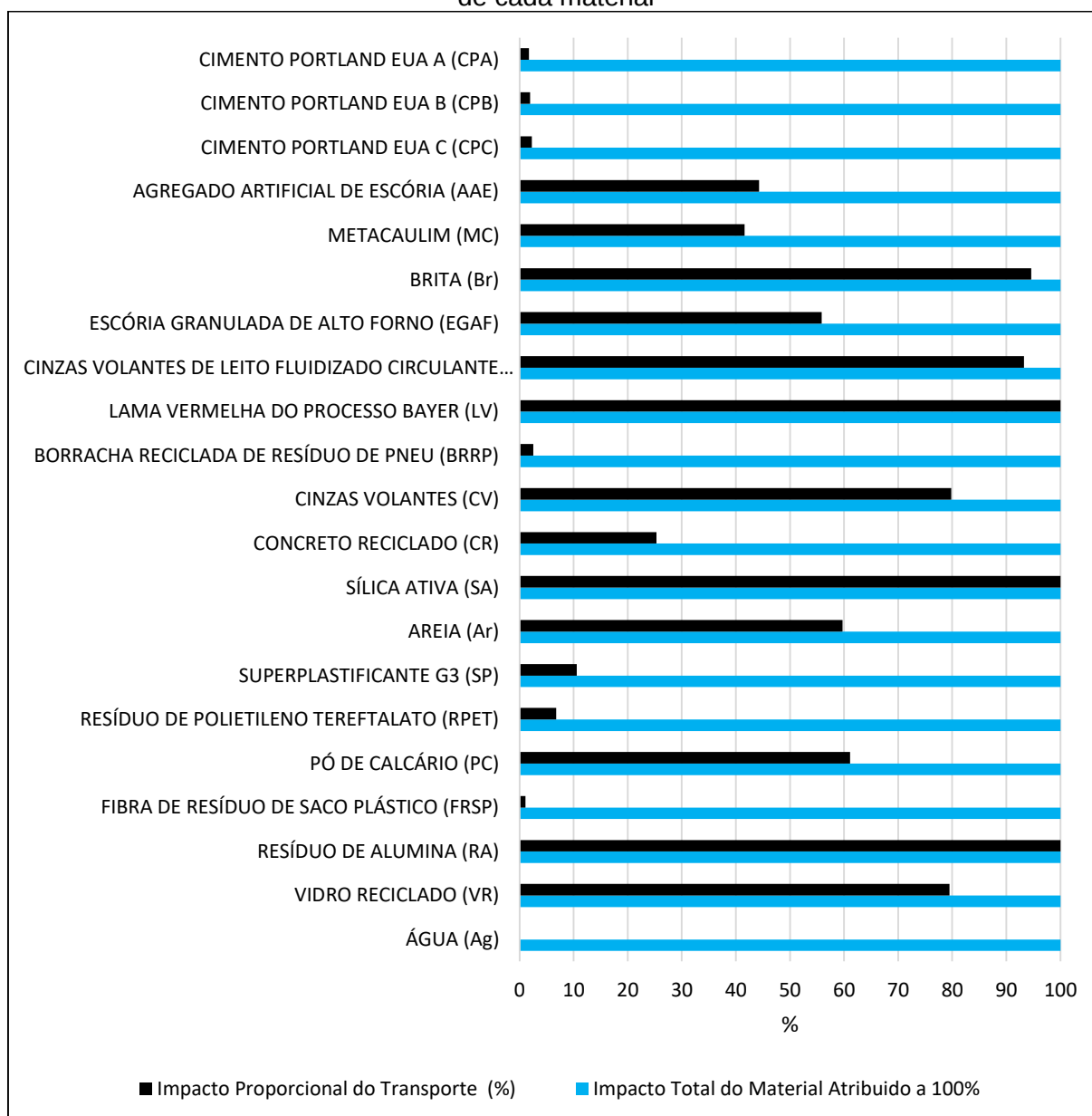
Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao analisar o Quadro 16 e a Figura 8 verificou-se que, para a média de consumo de material do consumo de energia não renovável, aquecimento global e dos efeitos respiratórios inorgânicos, o cimento apresenta o maior impacto ambiental, seguido pelo agregado artificial de escória e o metacaulim. O impacto do cimento e do metacaulim são altamente influenciados pelas etapas de extração, tratamento das matérias-primas e calcinação, pois esses processos são responsáveis pela emissão de grandes quantidades de particulados na atmosfera, gases estufa e consomem muita energia não renovável. O agregado artificial de escória se destaca por ser um subproduto que recebe um tratamento, logo, necessita do consumo de energia elétrica

e ainda utiliza o cimento em sua composição, agravando seu impacto. Por conseguinte, esses materiais devem ter seu consumo diminuído ou serem evitados. Outro aspecto interessante é a diferença de impacto entre os 3 tipos de cimento, uma vez que o Tipo B e Tipo C mostraram uma diminuição de impacto de aproximadamente 10% e 20% respectivamente em relação ao Tipo A.

Os outros materiais são menos poluentes do que os citados anteriormente e seus indicadores de poluição estão mais ligados ao tipo de alocação que receberam ou às distâncias de transporte. A Figura 9 expõe a proporção representada pelo transporte no impacto total de cada um dos materiais analisados nesta pesquisa.

Figura 9 - Caracterização dos 3 principais indicadores de *midpoints* para o consumo médio de cada material



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da figura 9 destaca que os materiais alocados como resíduos (lama vermelha do processo Bayer e resíduo de alumina) tem 100% do seu impacto advindo do transporte. Assim, a maior influência no impacto desses materiais é a distância e o modal de transporte utilizado. Embora a Sílica Ativa seja um subproduto industrial, o banco de dados *Ecoinvent 3.2* não atribui impacto para os processos anteriores a sua geração, por isso seu impacto também é 100% atribuído ao transporte.

Pode-se observar que, no caso do agregado artificial de escória, metacaulim, brita, cinzas, areia, pó de calcário e vidro reciclado, mais de 40% do impacto é influenciado

pelo transporte. Já no caso do cimento, borracha reciclada do resíduo de pneu, concreto reciclado, superplastificante, resíduo de polietileno e as fibras de resíduo de saco plástico, o transporte apresenta uma influência abaixo de 20%.

Deve ser direcionada uma atenção considerável aos materiais cimentícios suplementares, como a escória granulada de alto forno, as duas cinzas, a sílica ativa e o pó de calcário, pois podem ser importantes na substituição de partes do cimento, gerando ganhos ambientais acima de 20% no impacto total do concreto.

4.3.2. CLASSE 1A

Na classe 1A estão presentes as análises dos concretos de média resistência que vão de 20 MPa a 35 MPa com 77 traços de concretos. A ACV completa desses traços está na tabela B2 do apêndice B, e os traços estão ranqueados do traço de menor impacto para o traço de maior impacto de acordo com a pontuação única total que pondera todos os *midpoints* e *endpoints*.

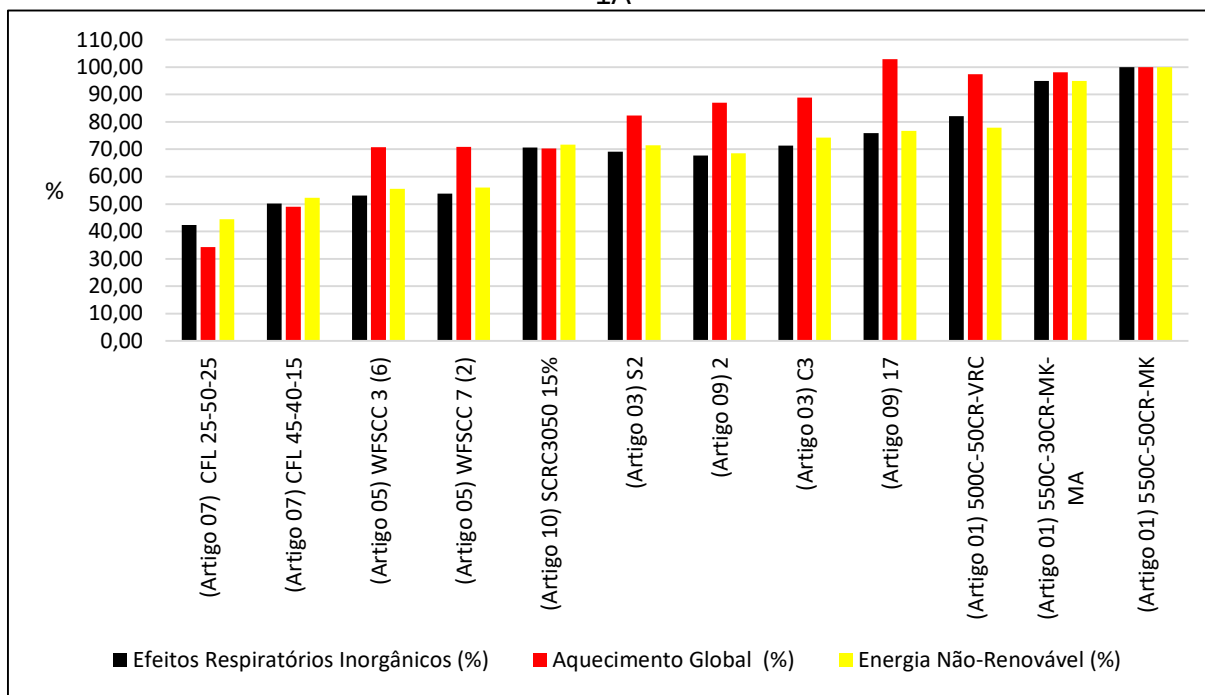
O Quadro 17 expõe os resultados dos 3 principais indicadores de *midpoints* da Classe 1A. Para esta análise foram selecionados 12 traços da categoria, abrangendo o pior traço, o melhor traço e os traços intermediários, sendo uma amostra significativa para mostrar as análises.

Quadro 17 - Resultado dos 3 principais indicadores de *midpoints* de 12 traços da Classe 1A

(Artigo) Traço	Efeitos respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não Renovável (MJ Primary)
(Artigo 07) CFL 25-50-25	0,22	188,66	1786,58
(Artigo 07) CFL 45-40-15	0,26	269,68	2098,07
(Artigo 05) WFSCC 3 (6)	0,28	388,76	2230,49
(Artigo 05) WFSCC 7 (2)	0,28	389,81	2247,05
(Artigo 10) SCRC3050 15%	0,37	386,04	2878,43
(Artigo 03) S2	0,36	452,40	2868,87
(Artigo 09) 2	0,35	478,20	2752,48
(Artigo 03) C3	0,37	488,76	2980,53
(Artigo 09) 17	0,40	565,79	3077,87
(Artigo 01) 500C-50CR-VRC	0,43	535,65	3125,05
(Artigo 01) 550C-30CR-MK-MA	0,50	539,07	3810,35
(Artigo 01) 550C-50CR-MK	0,52	549,61	4014,76

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 10 - Caracterização dos 3 principais indicadores de *midpoints* de 12 traços da Classe 1A



Fonte: Elaborado pelo Autor

Nota: A composição dos traços presentes no Quadro 17 e na Figura 10 encontram-se no apêndice A.

Ao analisar a Figura 10 e o Quadro 16 em ordem crescente do ponto de vista dos efeitos respiratórios inorgânicos, aquecimento global e energia não renovável verificou-se que:

- Os traços com alto desempenho ambiental estão em uma faixa de 0,22 a 0,28 Kg de PM_{2.5} eq, 188,66 a 389,81 kg de CO₂ eq. e 1786,58 a 2247,05 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 07) CFL 25-50-25, (Artigo 07) CFL 45-40-15, (Artigo 05) WFSCC 3 (6) e o (Artigo 05) WFSCC 7 (2). Apresentam como característica principal um baixo consumo de cimento tipo A (111,00 a 202,00 kg/m³) ou a utilização de cimento tipo B (430 kg/m³). No caso específico dos traços do artigo 7, a utilização de materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto forno e o pó de calcário, permitiu a baixa utilização do cimento com uma resistência considerável. No caso específico dos traços do artigo 5, embora tenha sido utilizada a Fibra de Resíduo de Saco Plástico, que necessita de um alto gasto energético para sua reciclagem, foram compensados com a significativa diminuição da utilização de areia e brita, que carregam um alto impacto decorrente da relação peso e distância de transporte

em conjunto com a utilização de cimento tipo B, que é 10% menos impactante que o tipo A.

- Os traços com desempenho ambiental intermediário estão em uma faixa de 0,28 a 0,37 Kg de PM_{2.5} eq, 389,81 a 488,76 kg de CO₂ eq. e 2247,05 a 2980,53 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 10) SCRC3050 15%, (Artigo 03) S2, (Artigo 09) 2, (Artigo 03) C3. Apresentam como característica principal um consumo intermediário de cimento tipo A (300,00 a 450,00 kg/m³) justificando as taxas mais elevadas de emissão de CO₂. No caso dos traços do artigo 10 foi utilizado o Resíduo de borracha de pneu para substituir a areia, porém esse resíduo não é uma boa opção devido ao seu alto consumo de energia no processo de reciclagem, além de contribuir para diminuir a resistência à compressão do concreto. Nos traços do artigo 03 foi utilizado o resíduo de PET combinado com sílica ativa e cinzas volantes, porém a combinação não trouxe ganhos consideráveis e a resistência à compressão é muito afetada com a utilização desse resíduo. No caso do traço do artigo 09, a utilização do resíduo de alumina na substituição da areia é uma boa opção, porém a alta utilização de cimento impossibilitou o alcance de uma posição melhor para esse traço.
- Os traços com baixo desempenho ambiental estão em uma faixa de 0,37 a 0,52 Kg de PM_{2.5} eq, 488,76 a 549,61 kg de CO₂ eq. e 2980,53 a 4014,76 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 09) 17, (Artigo 01) 500C-50CR-VRC, (Artigo 01) 550C-30CR-MK-MA, (Artigo 01) 550C-50CR-MK. Apresentam como característica principal um consumo alto de cimento tipo A (440,00 a 550,00 kg/m³), justificando as altas taxas de emissão de CO₂. No caso do artigo 01, a utilização de altas doses de cimento, conciliado com o uso de metacaulim e do resíduo de borracha, contribuiu para formar um concreto de baixa resistência e elevado impacto ambiental.
- O traço (Artigo 07) CFL 25-50-25 (menor impacto) apresenta índices de Efeitos Respiratórios Inorgânicos, Aquecimento Global e Energia não renovável de 57%, 65%, 55% respectivamente menor que o traço de maior impacto denominado (Artigo 01) 550C-50CR-MK (maior impacto).

Após apresentar as análises dos 3 principais *midpoints* da classe 1A, será apresentado o resultado da análise complementar da influência do cimento e das

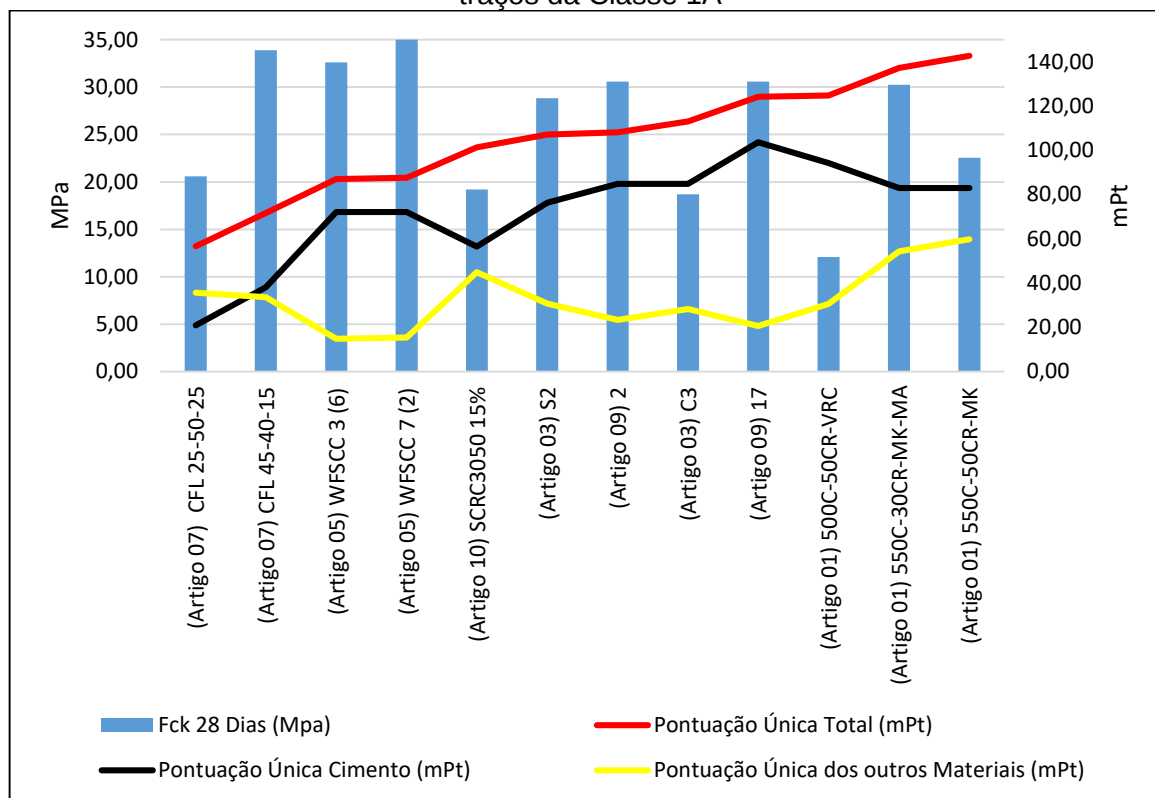
incorporações de resíduos e subprodutos industriais nas resistências. O Quadro 18 mostra a resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento. Já a Figura 11 expõe a comparação da resistência à compressão relacionada à pontuação única total e evidencia a relevância do cimento no impacto total.

Quadro 18 - Resultado da resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento de 12 traços da Classe 1A

(Artigo) Traço	Fck 28 Dias (MPa)	Pontuação Única Total (mPt)	Pontuação Única Cimento (mPt)	Pontuação Única dos outros Materiais (mPt)
(Artigo 07) CFL 25-50-25	20,60	56,59	20,92	35,67
(Artigo 07) CFL 45-40-15	33,90	71,75	38,07	33,68
(Artigo 05) WFSCC 3 (6)	32,60	86,95	72,08	14,88
(Artigo 05) WFSCC 7 (2)	35,00	87,54	72,08	15,46
(Artigo 10) SCRC3050 15%	19,21	101,41	56,54	44,86
(Artigo 03) S2	28,82	107,10	76,34	30,77
(Artigo 09) 2	30,60	108,13	84,82	23,31
(Artigo 03) C3	18,70	113,05	84,82	28,23
(Artigo 09) 17	30,60	124,26	103,66	20,60
(Artigo 01) 500C-50CR-VRC	12,10	124,80	94,24	30,56
(Artigo 01) 550C-30CR-MK-MA	30,24	137,30	82,93	54,37
(Artigo 01) 550C-50CR-MK	22,56	142,68	82,93	59,75

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 11 - Comparação da resistência à compressão em relação à pontuação única de 12 traços da Classe 1A



Fonte: Elaborado pelo Autor

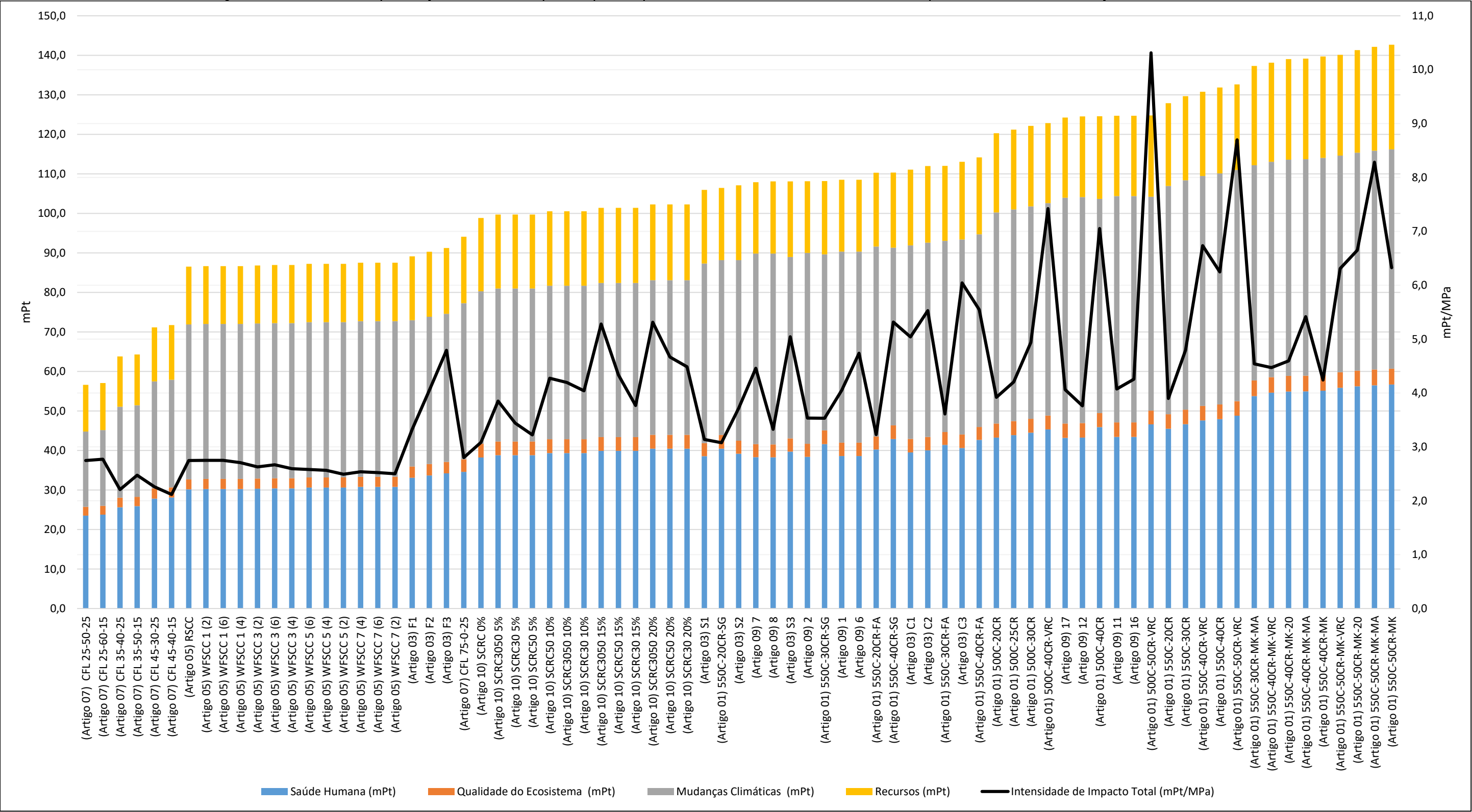
Ao analisar a Figura 11 e o Quadro 18 em ordem crescente da pontuação única, do ponto de vista da influência do cimento e incorporação de resíduos ou subprodutos industriais na resistência dos concretos, verificou-se que:

- Os traços (Artigo 07) CFL 25-50-25 e (Artigo 07) CFL 45-40-15 utilizaram da incorporação de cinzas volantes e do pó de calcário na substituição do cimento apresentando um bom desempenho ambiental sem grandes perdas no desempenho de resistência em relação à quantidade de cimento utilizada, pois fizeram o uso dos materiais cimentícios suplementares com alocações corretas;
- Os traços (Artigo 10) SCRC3050 15%, (Artigo 03) C3 e (Artigo 01) 500C-50CR-VRC tiveram perdas de resistência mesmo utilizando uma quantidade alta de cimento, pois o resíduo de borracha de pneu e o Resíduo de Polietileno Tereftalato prejudicam o desempenho técnico do concreto além de não se comportarem como boas para minimizar cargas ambientais;

- Os outros traços que apresentaram resistências mais elevadas foram beneficiados pela utilização de uma quantidade alta de cimento para a classe 1 de resistência, entretanto, por consequência, o desempenho ambiental foi afetado.

Para finalizar as análises da Classe 1A, a Figura 12 mostra a pontuação única de todos os traços divididos por *endpoint*. Assim, os *endpoints* mais afetados são a saúde humana, a qualidade dos ecossistemas e as mudanças Climáticas. Também foi gerado o indicador de intensidade de impacto para pontuação única total. Vale lembrar que os quadros com a composição de cada traço da categoria e a tabela com os valores que originaram o gráfico da Figura 12 se encontram no apêndice A e B desta dissertação.

Figura 12 - Resultado da pontuação única total separada por *endpoint* com o indicador de intensidade de impacto total de todos os traços da Classe 1A



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: A composição dos traços presentes na Figura 12 estão presentes no apêndice A.

Ao analisar a Figura 12 do ponto de vista dos *endpoints* em pontuação única, verificou-se que:

- O traço de maior impacto, denominado (Artigo 01) 550C-50CR-MK, apresenta para as categorias de danos Saúde humana, Qualidade do ecossistema, Mudanças Climáticas e Recursos os valores de 56, 68 mPt, 4,02 mPt, 55,51 mPt e 26,47 mPt, respectivamente, totalizando uma pontuação única total de 142,68 mPt. O traço de menor impacto, denominado (Artigo 07) 25-50-25, apresenta os valores de 23,51 mPt, 2,25 mPt, 19,05 mPt e 11,79 mPt, respectivamente, totalizando uma pontuação única total de 56,60 mPt, ou seja, um valor 60% menor;

Ao analisar a Figura 12 do ponto de vista da intensidade de impacto, verificou-se que:

- Há na figura alguns picos de intensidade de impacto, tais como nos traços (Artigo 03) F3, (Artigo 10) SCRC3050 20%, (Artigo 01) 500C-50CR-VRC. Isso representa uma alta perda de resistência com a incorporação de algum resíduo ou subproduto no concreto. No caso do artigo 03 o Resíduo de Polietileno Tereftalato (RPET) não oferece uma grande contribuição na melhoria do desempenho ambiental e ainda prejudica a resistência. No caso do artigo 01 e 10 a Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) também não oferece uma grande contribuição na melhoria do desempenho ambiental e ainda prejudica a resistência;
- O traço de maior impacto, denominado (Artigo 01) 550C-50CR-MK, apresenta uma intensidade de impacto de 6,32 mPt/MPa, enquanto o traço de menor impacto, denominado (Artigo 07) 25-50-25, apresenta uma intensidade de impacto de 2,75 mPt/MPa, ou seja, um valor 56% menor.

4.3.3. CLASSE 1B

Na classe 1B estão presentes as análises dos concretos de média resistência que vão de 35 MPa a 50 MPa com 31 traços de concretos. A ACV completa desses traços está na tabela B3 do apêndice B, e os traços estão ranqueados do traço de menor impacto

para o traço de maior impacto, de acordo com a pontuação única total que pondera todos os *midpoints* e *endpoints*.

O Quadro 18 expõe os resultados dos 3 principais indicadores de *midpoints* da Classe 1B. Para esta análise foram selecionados 12 traços da categoria abrangendo o pior traço, o melhor traço e os traços intermediários, sendo uma amostra significativa para apresentar as análises.

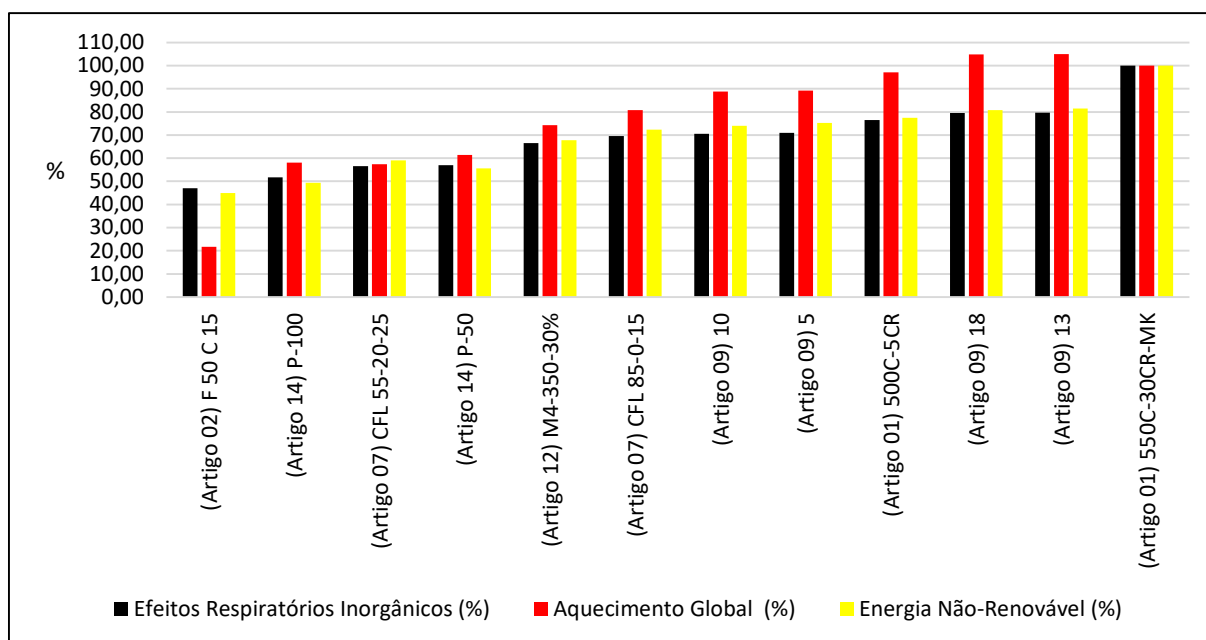
Quadro 19 - Resultado dos 3 principais indicadores de *midpoints* de 12 traços da Classe 1B

(Artigo) Traço	Efeitos respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não-Renovável (MJ Primary)
(Artigo 02) F 50 C 15	0,23	117,01	1711,98
(Artigo 14) P-100	0,26	313,35	1878,68
(Artigo 07) CFL 55-20-25	0,28	309,09	2250,05
(Artigo 14) P-50	0,28	330,64	2119,82
(Artigo 12) M4-350-30%	0,33	399,99	2583,59
(Artigo 07) CFL 85-0-15	0,34	435,25	2755,23
(Artigo 09) 10	0,35	478,99	2819,42
(Artigo 09) 5	0,35	480,99	2866,81
(Artigo 01) 500C-5CR	0,38	523,63	2949,34
(Artigo 09) 18	0,39	565,14	3076,60
(Artigo 09) 13	0,39	566,18	3101,26
(Artigo 01) 550C-30CR-MK	0,50	539,07	3810,35

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 - Caracterização dos 3 principais indicadores de *midpoints* de 12 traços da Classe

1B



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: A composição dos traços presentes no Quadro 18 e na Figura 13 estão apresentados no apêndice A.

Ao analisar a Figura 13 e o Quadro 19 em ordem crescente do ponto de vista dos efeitos respiratórios inorgânicos, aquecimento global e energia não renovável, verificou-se que:

- Os traços com alto desempenho ambiental estão em uma faixa de 0,23 a 0,28 Kg de PM_{2.5} eq, 117,01 a 330,64 kg de CO₂ eq. e 1711,98 a 2119,82 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 02) F 50 C 15, (Artigo 14) P-100, (Artigo 07) CFL 55-20-25 e o (Artigo 14) P-50. Apresentam como característica principal um baixo consumo de cimento tipo A (0 a 248,00 kg/m³) ou a utilização de cimento tipo C (409,6 kg/m³). No caso específico dos traços do artigo 02, a utilização de materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto forno, cinzas volantes e as cinzas volantes de leito fluidizado circulante, permitiu a substituição total do cimento e um desempenho elevado de resistência à compressão. No caso específico dos traços do artigo 7, a utilização de materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto forno e o pó de calcário, permitiu a baixa utilização do cimento e um desempenho de resistência à compressão considerável. No caso específico do artigo 14, a

combinação do cimento tipo C (20% menos agressivo do que o cimento tipo A) com o pó de calcário e o concreto reciclado resultou em um bom desempenho ambiental. O pó de calcário e o concreto reciclado apresentaram baixo impacto ambiental nas análises individuais.

- Os traços com desempenho ambiental intermediário estão em uma faixa de 0,28 a 0,35 Kg de PM_{2.5} eq, 330,64 a 480,99 kg de CO₂ eq. e 2119,82 a 2866,81 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 12) M4-350-30%, (Artigo 07) CFL 85-0-15, (Artigo 09) 10, (Artigo 09) 5. Apresentam como característica principal um consumo intermediário de cimento tipo A (350,00 a 450,00 kg/m³), o que justifica as taxas mais elevadas de emissão de CO₂. No caso específico dos traços do Artigo 09 e 12, a utilização do resíduo de alumina e do resíduo de vidro na substituição da areia é uma boa opção, porém a alta utilização de cimento impossibilitou o alcance de uma posição melhor para esses traços.
- Os traços com baixo desempenho ambiental estão em uma faixa de 0,35 a 0,50 Kg de PM_{2.5} eq, 480,99 a 539,07 kg de CO₂ eq. e 2866,81 a 3810,35 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 01) 500C-5CR, (Artigo 09) 18, (Artigo 09) 13, (Artigo 01) 550C-30CR-MK. Apresentam como característica principal um consumo alto de cimento tipo A (440,00 a 550,00 kg/m³), o que justifica as altas taxas de emissão de CO₂.
- O traço de menos impacto da classe 1B denominado (Artigo 02) F 50 C 15 apresenta índices de Efeitos Respiratórios Inorgânicos, Aquecimento Global e Energia não-renovável de 53%, 78,3%, 55% respectivamente, menor do que o traço de maior impacto denominado (Artigo 01) 550C-30CR-MK.

Após apontar as análises dos 3 principais *midpoints* da classe 1A, será apresentado o resultado da análise complementar da influência do cimento e das incorporações de resíduos e subprodutos industriais nas resistências. O Quadro 20 mostra a resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento. Já a Figura 14 expõe comparação da resistência à

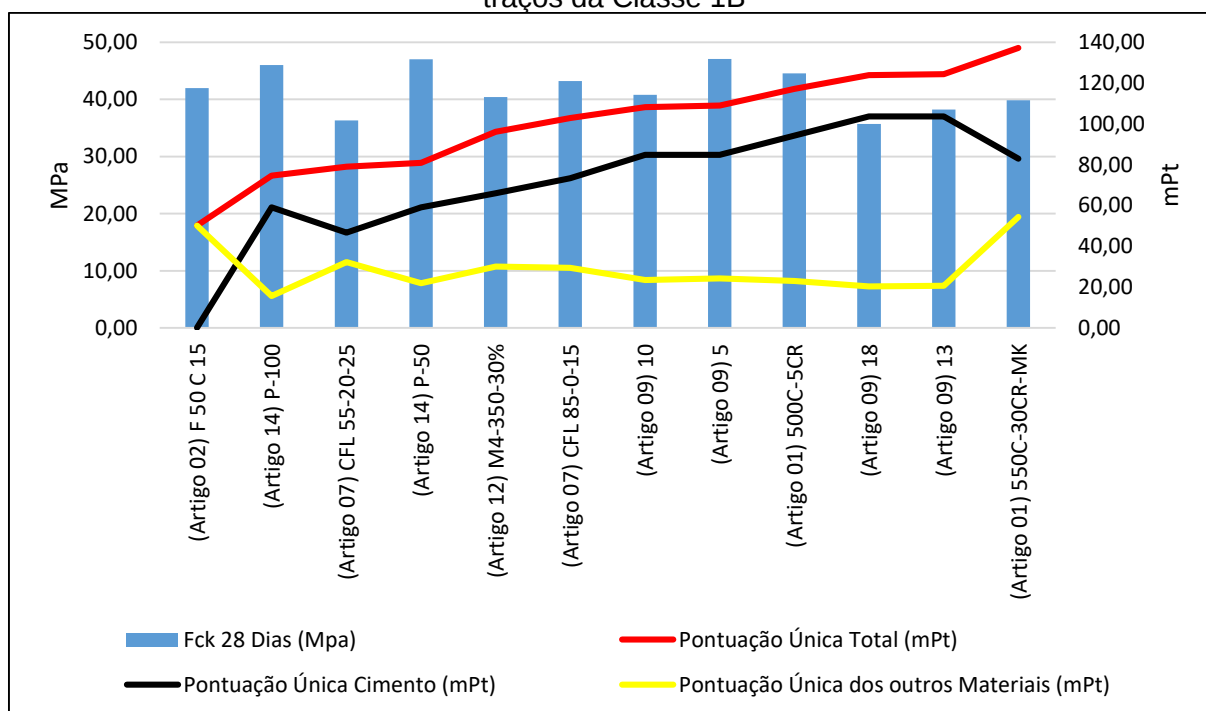
compressão relacionada à pontuação única total e evidencia a relevância do cimento no impacto total.

Quadro 20 - Resultado da resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento de 12 traços da Classe 1B

(Artigo) Traço	Fck 28 Dias (MPa)	Pontuação Única Total (mPt)	Pontuação Única Cimento (mPt)	Pontuação Única dos outros Materiais (mPt)
(Artigo 02) F 50 C 15	42,00	50,18	0	50,18
(Artigo 14) P-100	46,00	74,60	59,02	15,58
(Artigo 07) CFL 55-20-25	36,30	79,00	46,74	32,25
(Artigo 14) P-50	47,00	80,86	59,02	21,84
(Artigo 12) M4-350-30%	40,40	96,06	65,97	30,09
(Artigo 07) CFL 85-0-15	43,20	102,81	73,32	29,49
(Artigo 09) 10	40,80	108,25	84,82	23,43
(Artigo 09) 5	47,10	109,05	84,82	24,24
(Artigo 01) 500C-5CR	44,54	117,20	94,24	22,96
(Artigo 09) 18	35,70	123,94	103,66	20,28
(Artigo 09) 13	38,20	124,36	103,66	20,69
(Artigo 01) 550C-30CR-MK	39,83	137,30	82,93	54,37

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 - Comparação da resistência à compressão em relação a pontuação única de 12 traços da Classe 1B

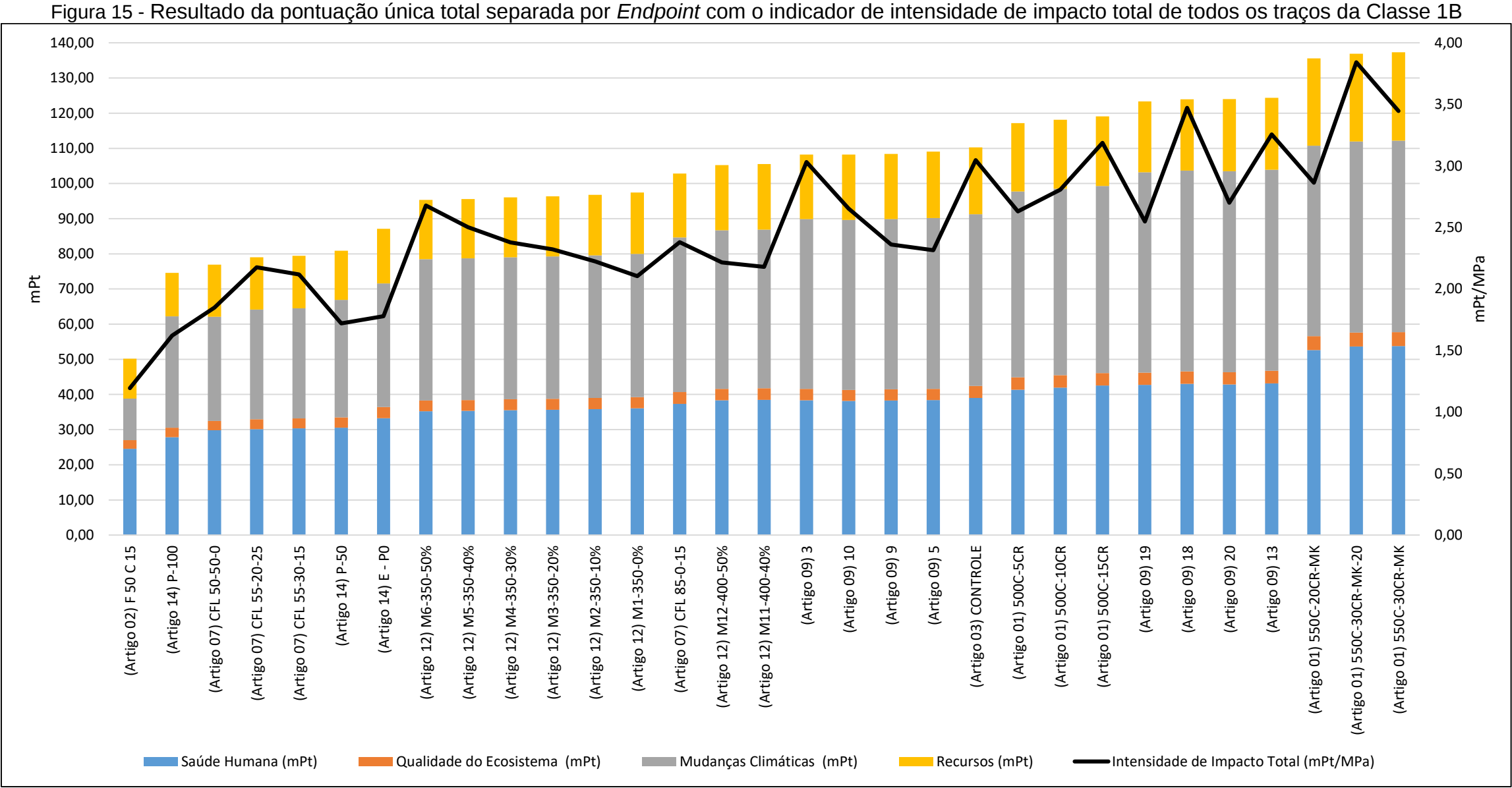


Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a Figura 14 e o Quadro 20 em ordem crescente da pontuação única, do ponto de vista da influência do cimento e incorporação de resíduos ou subprodutos industriais na resistência dos concretos, verificou-se que:

- O traço (Artigo 02) F 50 C 15 se destaca por não utilizar cimento em sua composição e mesmo assim alcançou uma resistência elevada utilizando exclusivamente escória de alto forno, cinzas volantes e cinzas volantes de leito fluidizado circulante, que são materiais cimentícios suplementares. O traço (Artigo 07) CFL 55-20-25 também utiliza materiais cimentícios suplementares para substituir uma parte do cimento e apresenta bons resultados de resistência e impacto ambiental.
- Os traços do artigo 14 se destacam por utilizar o cimento tipo C (20% menos agressivo do que o tipo A) associado ao concreto reciclado e pó de calcário, alcançando bons resultados de resistência e impacto ambiental.
- Os outros traços, na tentativa de utilizar resíduos e alcançar uma moderada resistência, optaram por utilizar uma quantidade alta de cimento, entretanto, por consequência, afetou o desempenho ambiental.

Para finalizar as análises da classe 1B, a Figura 15 mostra a pontuação única de todos os traços divididos por *endpoint*. Assim, os *endpoints* mais afetados foram a saúde humana, qualidade dos ecossistemas e mudanças climáticas. Também se gerou o indicador de intensidade de impacto da pontuação única total. Vale lembrar que os quadros com a composição de cada traço da categoria e o quadro com os valores que originaram o gráfico da Figura 15 se encontram no apêndice A e B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: A composição dos traços presentes na Figura 15 encontram-se no apêndice A.

Ao analisar a Figura 15 do ponto de vista dos *midpoints* em pontuação única, verificou-se que:

- O traço de maior impacto, denominado (Artigo 01) 550C-30CR-MK, apresenta para as categorias de danos saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos os valores de 53,78 mPt, 3,95 mPt, 54,45 mPt e 25,12 mPt, respectivamente, totalizando uma pontuação única de 137,3 mPt. O traço de menor impacto, denominado (Artigo 02) F 50 C 15, apresenta os valores de 24,57 mPt, 2,43 mPt, 11,82 mPt e 11,36 mPt, respectivamente, totalizando uma pontuação única de 50,18 mPt, ou seja, um valor 63% menor;

Ao analisar a Figura 15 do ponto de vista da intensidade de impacto, verificou-se que:

- O traço de maior impacto, denominado (Artigo 01) 550C-30CR-MK, apresenta uma intensidade de impacto de 3,42 mPt/MPa, enquanto o traço de menor impacto, denominado (Artigo 02) F 50 C 15, apresenta uma intensidade de impacto de 1,19 mPt/MPa, ou seja, um valor 65% menor.

4.3.4. CLASSE 2

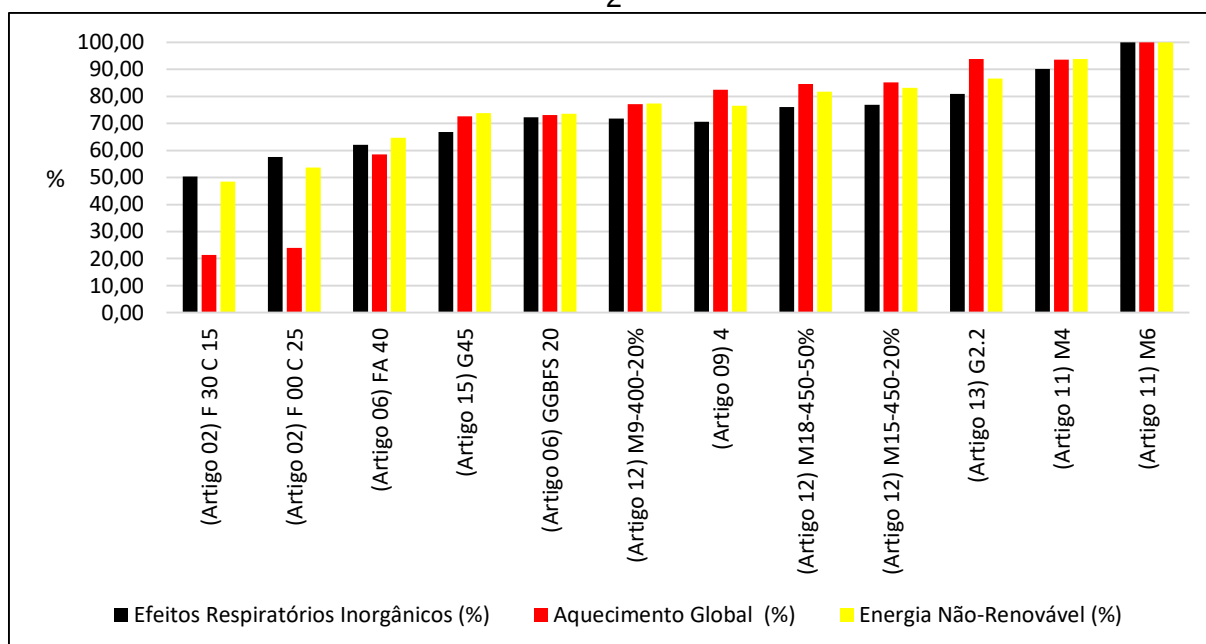
Na classe 2 estão as análises dos concretos de alta resistência, que vão de 50 MPa a 80 MPa com 54 traços de concretos. A ACV completa desses traços está no Quadro B4 do apêndice B e os traços estão ranqueados do traço de menor impacto para o traço de maior impacto, de acordo com a pontuação única total que pondera todos os *midpoints* e *endpoints*.

O Quadro 21 expõe os resultados dos 3 principais indicadores de *midpoints* da Classe 2. Para essa análise foram selecionados 12 traços da categoria, abrangendo o pior traço, o melhor traço e os traços intermediários, tornando-se uma amostra significativa para apresentar as análises.

Quadro 21 - Resultado dos 3 principais indicadores de *midpoints* de 12 traços da Classe 2

(Artigo) Traço	Efeitos respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não Renovável (MJ Primary)
(Artigo 02) F 30 C 15	0,25	124,49	1796,42
(Artigo 02) F 00 C 25	0,29	139,79	1989,50
(Artigo 06) FA 40	0,31	341,19	2394,60
(Artigo 15) G45	0,33	422,90	2733,26
(Artigo 06) GGBFS 20	0,36	425,50	2724,05
(Artigo 12) M9-400-20%	0,36	449,43	2865,58
(Artigo 09) 4	0,35	480,35	2835,57
(Artigo 12) M18-450-50%	0,38	492,98	3026,65
(Artigo 12) M15-450-20%	0,38	495,94	3082,27
(Artigo 13) G2.2	0,40	546,31	3209,55
(Artigo 11) M4	0,45	545,24	3473,95
(Artigo 11) M6	0,50	582,31	3703,69

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 16 - Caracterização dos 3 principais indicadores de *midpoints* de 12 traços da Classe 2

Fonte: Elaborado pelo Autor

Nota: A composição dos traços presentes no Quadro 20 e na Figura 16 encontram-se no apêndice A.

Ao analisar a Figura 16 e o Quadro 21 em ordem crescente do ponto de vista dos efeitos respiratórios inorgânicos, aquecimento global e energia não renovável, verificou-se que:

- Os traços com alto desempenho ambiental estão em uma faixa de 0,25 a 0,33 Kg de PM2.5 eq, 124,49 a 422,90 kg de CO₂ eq. e 1796,42 a 2733,26 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 02) F 30 C 15, (Artigo 02) F 00 C 25, (Artigo 06) FA 40, (Artigo 15) G45. Apresentam como característica principal um baixo consumo de cimento tipo A (0 a 375,00 kg/m³). No caso específico dos traços do artigo 02, a utilização de materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto forno, cinzas volantes e as cinzas volantes de leito fluidizado circulante, permitiu a substituição total do cimento e um desempenho de resistência à compressão elevado. O traço (Artigo 06) FA 40 também utiliza um material cimentício suplementar, substituindo parte do cimento por cinzas volantes, e consegue alcançar um bom desempenho ambiental e uma boa resistência à compressão. Já o artigo 15 utiliza vidro reciclado para substituir areia e brita e também consegue um bom desempenho ambiental levando em consideração o baixo impacto para trituração do vidro.
- Os traços com desempenho ambiental intermediário estão em uma faixa de 0,36 a 0,38 Kg de PM2.5 eq, 422,90 a 492,98 kg de CO₂ eq. e 2733,26 a 3703,69 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 06) GGBFS 20, (Artigo 12) M9-400-20%, (Artigo 09) 4, (Artigo 12) M18-450-50%. Apresentam como característica principal um consumo intermediário de cimento tipo A (368,00 a 450,00 kg/m³), o que justifica as taxas mais elevadas de emissão de CO₂.
- Os traços com baixo desempenho ambiental estão em uma faixa de 0,38 a 0,50 Kg de PM2.5 eq, 492,98 a 582,31 kg de CO₂ eq. e 3703,69 a 3703,69 MJ primário, respectivamente, e são os seguintes: (Artigo 12) M15-450-20%, (Artigo 13) G2.2, (Artigo 11) M4, (Artigo 11) M6. Apresentam como característica principal um consumo alto de cimento tipo A (440,00 a 550,00 kg/m³), o que justifica as altas taxas de emissão de CO₂. No caso específico dos artigos 12 e 13, utiliza-se uma quantidade elevada de cimento tipo A, o que prejudica seriamente o desempenho ambiental. No caso específico do artigo 11, além de utilizar uma quantidade alta de cimento, também utiliza o agregado artificial de escória que apresenta cimento em sua composição e inviabiliza a

utilização desse material com o objetivo de reduzir impacto ambiental no concreto.

- O traço (Artigo 02) F 30 C 15 (menor impacto) apresenta índices de efeitos respiratórios inorgânicos, aquecimento global e energia não renovável de 50%, 79%, 52%, respectivamente, menor do que o traço de maior impacto denominado (Artigo 11) M6.

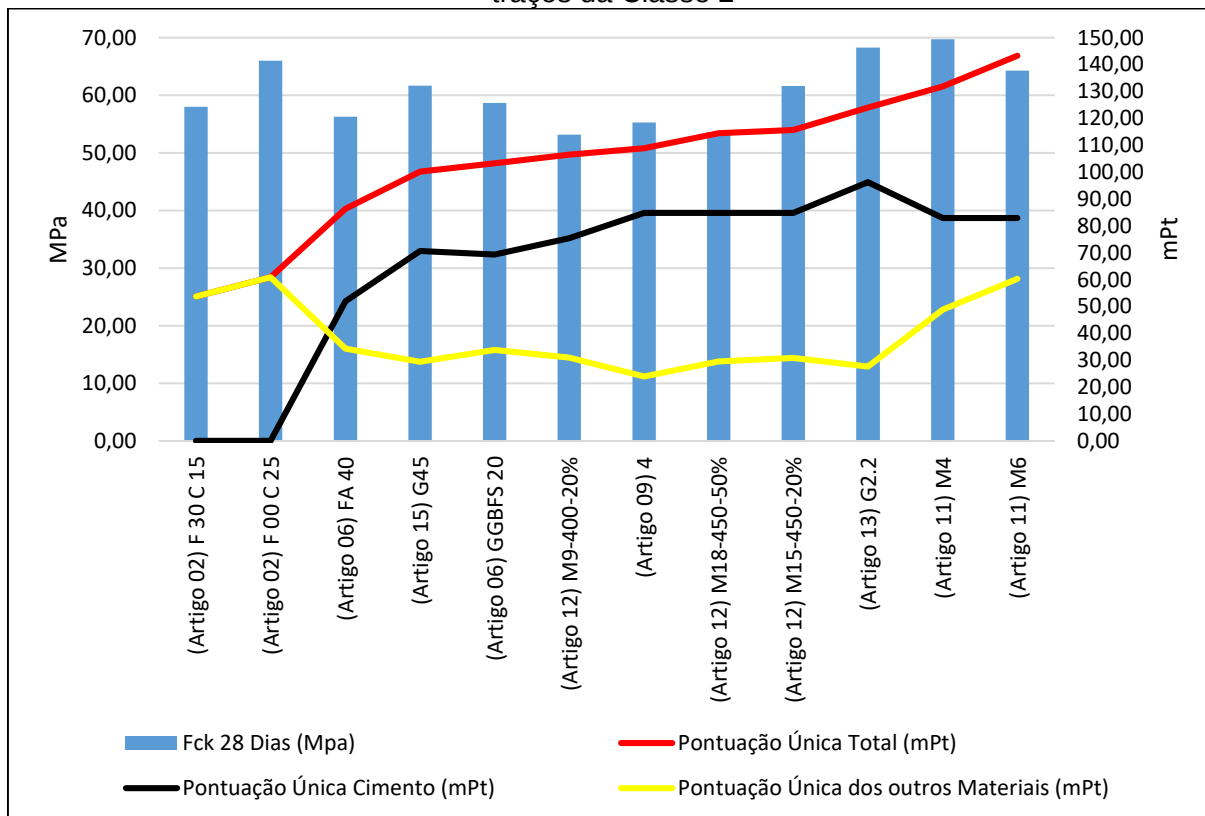
Após mostrar as análises dos 3 principais *midpoints* da classe 2, será apresentado o resultado da análise complementar da influência do cimento e das incorporações de resíduos e subprodutos industriais nas resistências. O Quadro 22 mostra a resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento. Já a figura 17 expõe comparação da resistência à compressão relacionado à pontuação única total e evidencia a relevância do cimento no impacto total.

Quadro 22 - Resultado da resistência à compressão aos 28 dias, pontuação única total, pontuação única do cimento e a pontuação única sem o cimento de 12 traços da Classe 2

(Artigo) Traço	Fck 28 Dias (MPa)	Pontuação Única Total (mPt)	Pontuação Única Cimento (mPt)	Pontuação Única dos outros Materiais (mPt)
(Artigo 02) F 30 C 15	58,00	53,77	0	53,77
(Artigo 02) F 00 C 25	66,00	60,91	0	60,91
(Artigo 06) FA 40	56,30	86,33	52,02	34,31
(Artigo 15) G45	61,70	100,14	70,68	29,46
(Artigo 06) GGBFS 20	58,70	103,25	69,36	33,89
(Artigo 12) M9-400-20%	53,20	106,46	75,39	31,06
(Artigo 09) 4	55,30	108,86	84,82	24,04
(Artigo 12) M18-450-50%	53,60	114,43	84,82	29,61
(Artigo 12) M15-450-20%	61,60	115,66	84,82	30,84
(Artigo 13) G2.2	68,30	124,04	96,31	27,72
(Artigo 11) M4	69,74	131,84	82,93	48,91
(Artigo 11) M6	64,27	143,24	82,93	60,31

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 17 - Comparação da resistência à compressão em relação à pontuação única de 12 traços da Classe 2



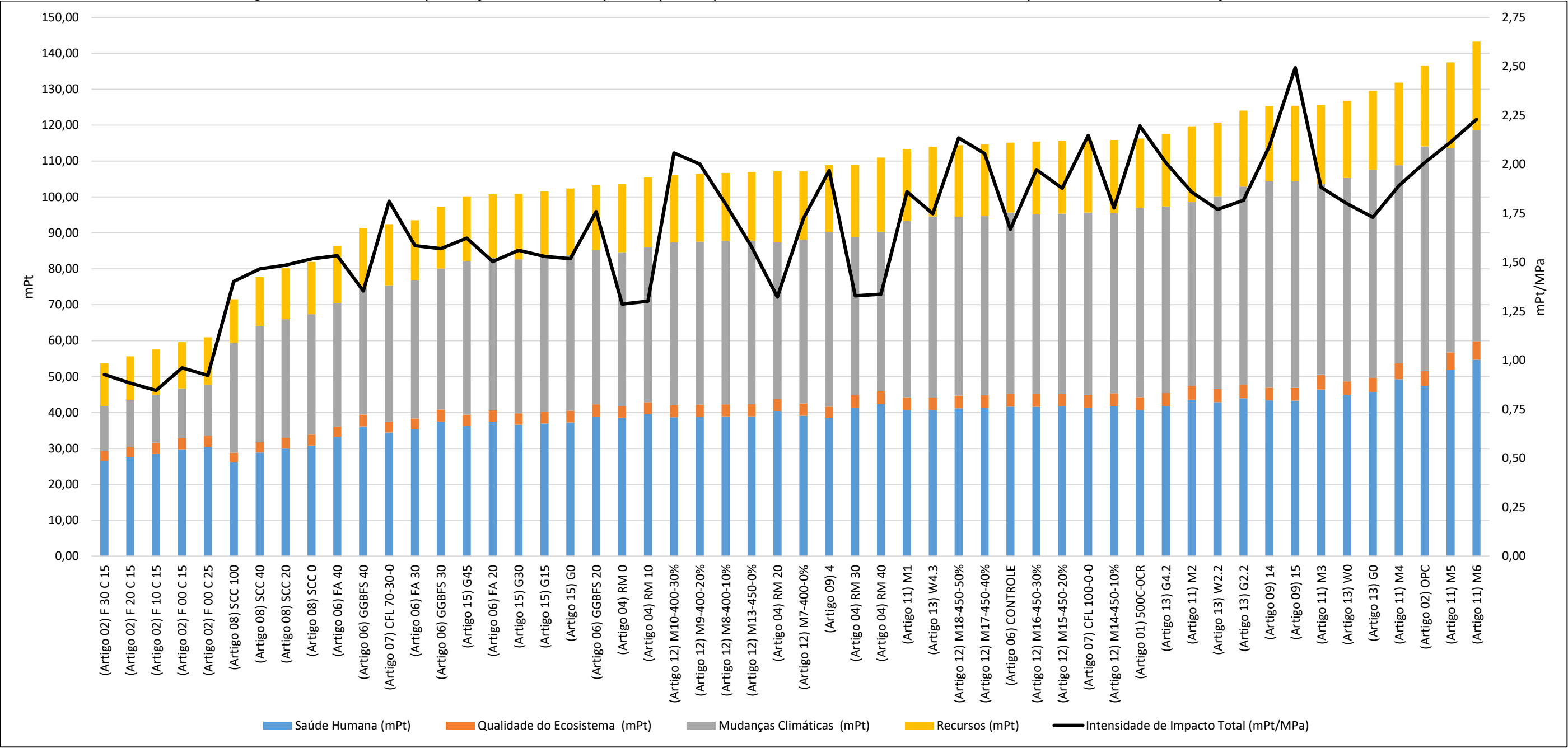
Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao analisar a Figura 17 e o Quadro 21 em ordem crescente da pontuação única, do ponto de vista da influência do cimento e incorporação de resíduos ou subprodutos industriais na resistência dos concretos, verificou-se que:

- Os traços (Artigo 02) F 30 C 15 e (Artigo 02) F 00 C 25 se destacam por não utilizar cimento em sua composição e, mesmo assim, alcançaram uma resistência elevada ao usar exclusivamente escória de alto forno, cinzas volantes e cinzas volantes de leito fluidizado circulante, que são materiais cimentícios suplementares.
- Os outros traços, na tentativa de utilizar resíduos e alcançar uma alta resistência, optaram por utilizar uma quantidade alta de cimento, entretanto, por consequência, o desempenho ambiental foi afetado negativamente.

Para finalizar as análises da Classe 2 a Figura 18 mostra a pontuação única de todos os traços divididos por *Endpoint* e a intensidade de impacto total.

Figura 18 - Resultado da pontuação única total separada por *endpoint* com o indicador de intensidade de impacto total de todos os traços da Classe 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: A composição dos traços presentes na figura 18 encontram-se no apêndice A.

Ao analisar a Figura 18 do ponto de vista dos *endpoints* em pontuação única, verificou-se que:

- O traço de maior impacto, denominado (Artigo 02) F 30 C 15, apresenta para as categorias de danos saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos os valores de 54,71 mPt, 5,14 mPt, 58,81 mPt e 24,58 mPt, respectivamente, totalizando uma pontuação única de 143,24 mPt. O traço de menor impacto, denominado (Artigo 11) M6, apresenta os valores de 26,55 mPt, 2,71 mPt, 12,57 mPt e 11,95 mPt, respectivamente, totalizando uma pontuação única de 53,78 mPt, ou seja, um valor 62% menor;

Ao analisar a Figura 18 do ponto de vista da intensidade de impacto, verificou-se que:

- O traço de maior impacto, denominado (Artigo 11) M6, apresenta uma intensidade de impacto de 2,23 mPt/MPa, enquanto o traço de menor impacto, denominado (Artigo 02) F 30 C 15, apresenta uma intensidade de impacto de 0,93 mPt/MPa, ou seja, um valor 58% menor.

4.3.5. COMPARAÇÃO ENTRE CLASSES DE RESISTÊNCIA

Nesta seção será apresentada uma análise comparativa entre os melhores e os piores traços de cada classe de resistência. O Quadro 23 retrata os melhores e os piores traços do ponto de vista ambiental de cada classe, bem como os seus respectivos *endpoints* em pontuação única.

Quadro 23 - Comparação dos *endpoints* em pontuação única dos melhores e piores traços de cada classe de resistência

CLASSE RESISTÊNCIA	CLASSIFICAÇÃO	(ARTIGO) NOME DO TRAÇO	Saúde Humana (mPt)	Qualidade do Ecossistema (mPt)	Mudanças Climáticas (mPt)	Recursos (mPt)
CLASSE 1A	Mín.	(Artigo 07) CFL 25-50-25	23,51	2,25	19,05	11,79
	Max.	(Artigo 01) 550C-50CR-MK	56,68	4,02	55,51	26,47
CLASSE 1B	Mín.	(Artigo 02) F 50 C 15	24,57	2,43	11,82	11,36
	Max.	(Artigo 01) 550C-30CR-MK	53,78	3,95	54,45	25,12
CLASSE 2	Mín.	(Artigo 02) F 30 C 15	26,55	2,71	12,57	11,95
	Max.	(Artigo 11) M6	54,71	5,14	58,81	24,58

Fonte: Elaborado pelo autor

O Quadro 24 apresenta os melhores e os piores traços do ponto de vista ambiental de cada classe, bem como o seu indicador de intensidade de impacto.

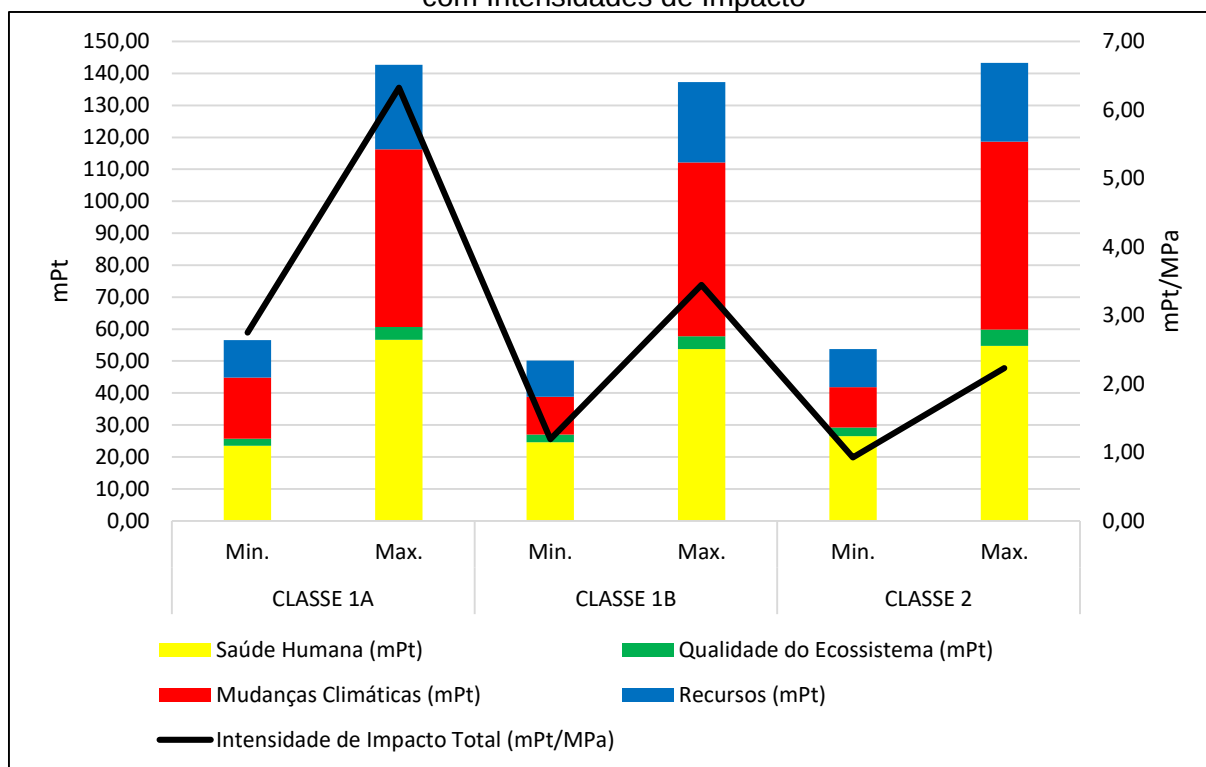
Quadro 24 - Comparação do indicador de Intensidade de Impacto dos melhores e piores traços de cada classe de resistência

CLASSE RESISTÊNCIA	CLASSIFICAÇÃO	(ARTIGO) NOME DO TRAÇO	Intensidade de Impacto Total (mPt/MPa)
CLASSE 1A	Mín.	(Artigo 07) CFL 25-50-25	2,75
	Max.	(Artigo 01) 550C-50CR-MK	6,32
CLASSE 1B	Mín.	(Artigo 02) F 50 C 15	1,19
	Max.	(Artigo 01) 550C-30CR-MK	3,45
CLASSE 2	Mín.	(Artigo 02) F 30 C 15	0,93
	Max.	(Artigo 11) M6	2,23

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 19 apresenta uma comparação dos melhores e dos piores traços do ponto de vista ambiental de cada classe, salientando a pontuação única total dividida em *midpoints*, juntamente com a intensidade de impacto.

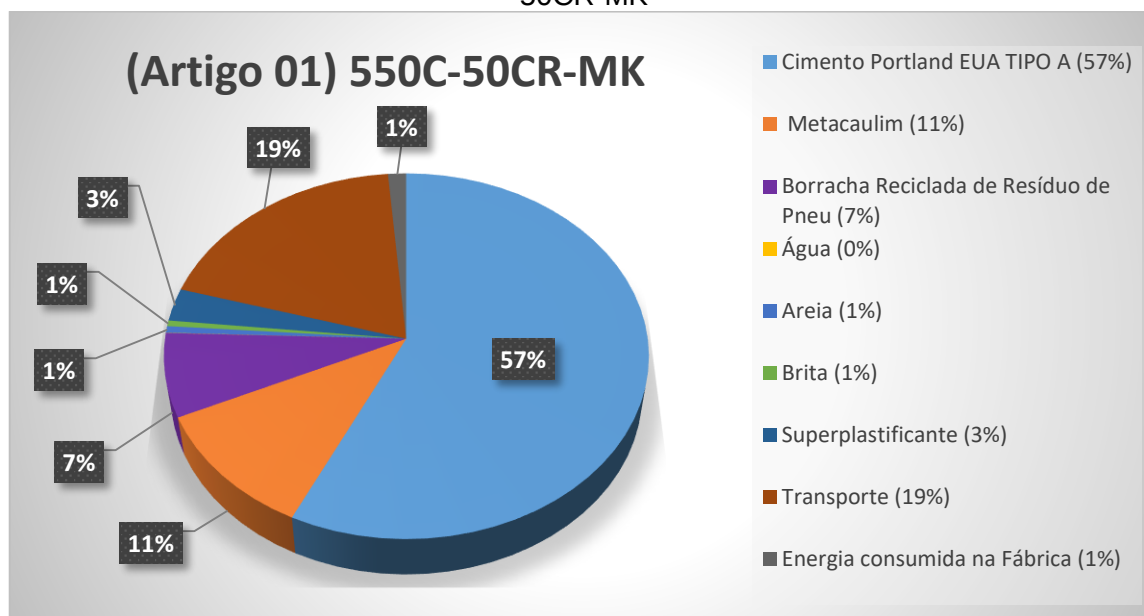
Figura 19 - Pontuação única total por classe de resistência dividida em *midpoints* juntamente com Intensidades de Impacto



Fonte: Elaborado pelo autor

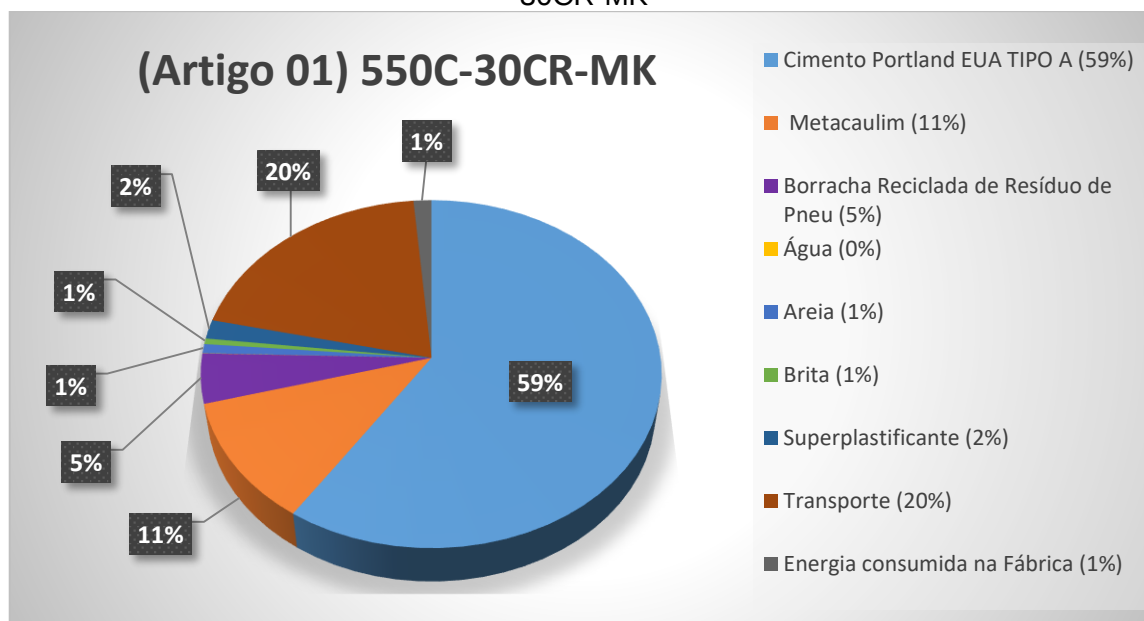
As Figuras 20, 21 e 22 mostram a proporção representada por cada componente do pior traço de cada classe de resistência. Já as figuras 23, 24 e 25 mostram a proporção representada por cada componente do melhor traço de cada classe de resistência.

Figura 20 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 01) 550C-50CR-MK



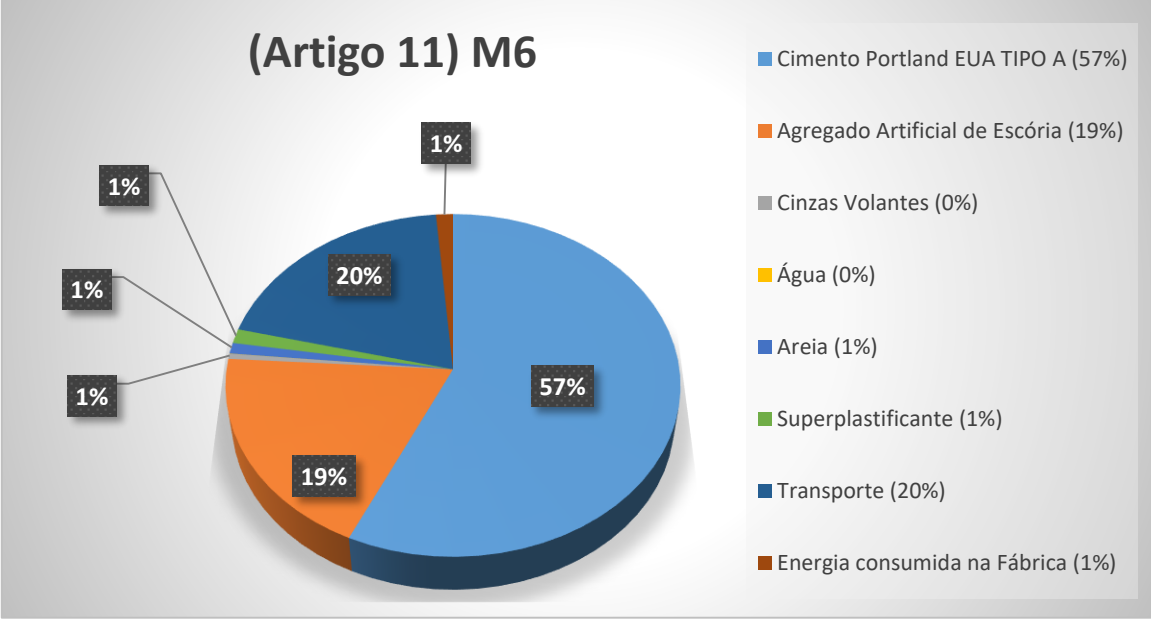
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 01) 550C-30CR-MK



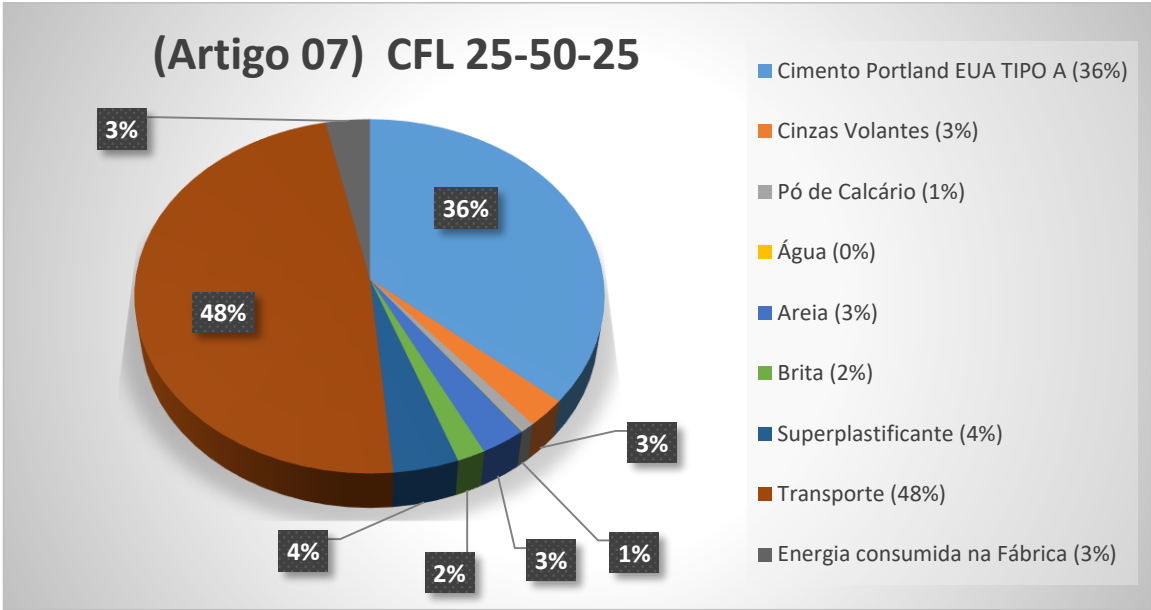
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 11) M6



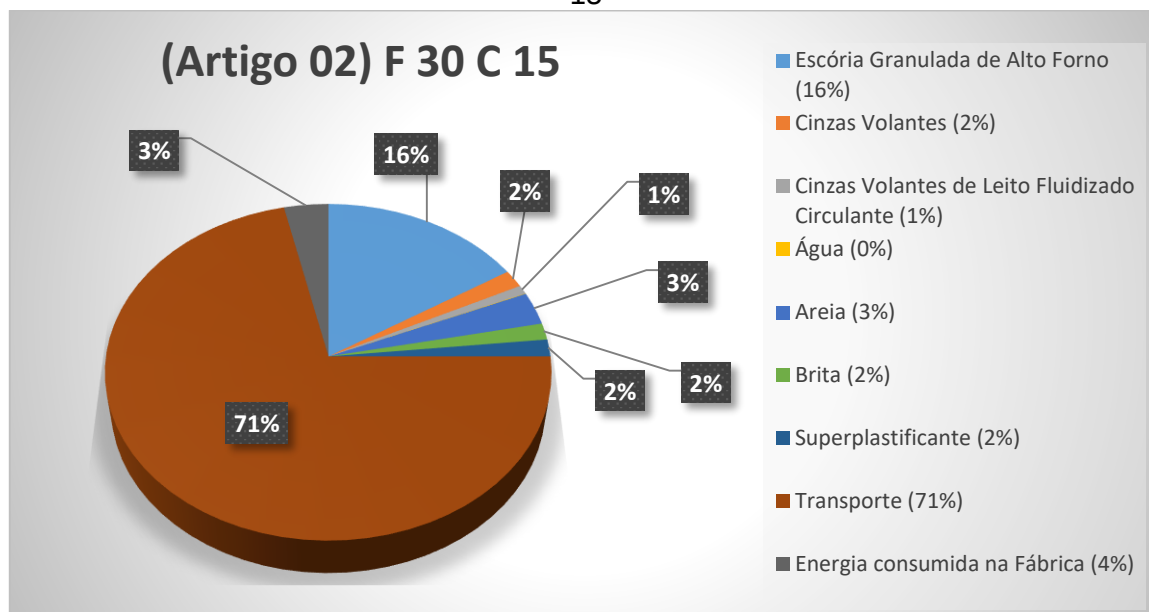
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 07) CFL 25-50-25



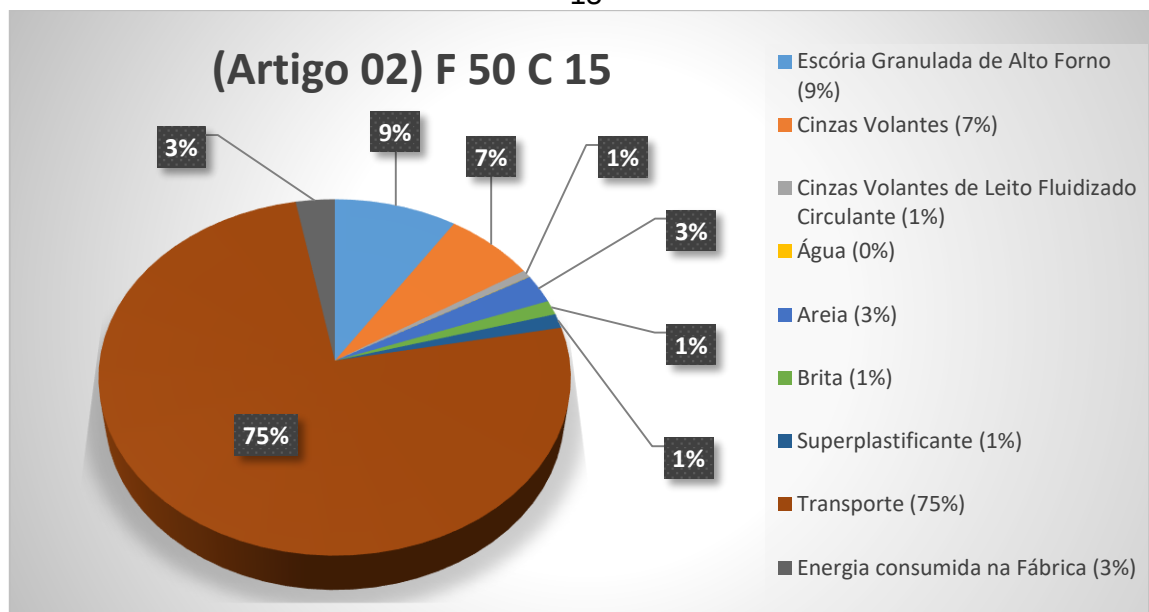
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 02) F 30 C 15



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 - Proporção dos impactos ambientais por componente do traço (Artigo 02) F 50 C 15



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar os Quadros 23 e 24, em conjunto com as Figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25, do ponto de vista do impacto total dos piores traços e dos melhores traços de cada categoria, verificou-se que:

- A impacto total dos piores traços de cada classe foi de 142,6 mPt com intensidade de impacto de 6,32 mPt/MPa para o pior traço da classe 1A, 137,3

mPt com intensidade de impacto de 3,45 mPt/MPa para o pior traço da classe 1B e 143,2 mPt com intensidade de impacto de 2,23 mPt/Mpa para o pior traço da classe 2. Os piores traços revelam uma diferença de impacto, em mPt, menor que 5%, e as diferenças de intensidade de impacto são maiores do que 35% quando muda das classes menores para maiores;

- O impacto total dos melhores traços de cada classe foi de 56,6 mPt com intensidade de impacto de 2,75 mPt/MPa para o melhor traço da classe 1A, 50,18 mPt com intensidade de impacto de 1,19 mPt/MPa para o melhor traço da classe 1B e 53,78 mPt com intensidade de impacto de 0,93 mPt/MPa para o melhor traço da classe 2. Os melhores traços apresentam uma diferença de impacto, em mPt, menor do que 11% e as diferenças de intensidade de impacto são maiores do que 20% quando muda das classes menores para maiores;
- Os processos mais impactantes nos piores traços de cada classe são disparadamente a produção de cimento, em média 57%, e o transporte, em média 20%, totalizando 77% do impacto total dos traços. As adições também representaram um alto impacto, sendo o Metacaulim, em média 11%, a Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu, em média 5%, e o Agregado Artificial de Escória, em média 19%. No caso do Metacaulim, a sua alocação como produto faz com que ele carregue todo o impacto ambiental desde a extração dos materiais referente à sua produção, não se comportando como um bom material para minimizar os impactos ambientais do concreto. No caso da Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu, embora seja um produto reciclado, o seu processo de reciclagem envolve muitas etapas e um alto consumo de energia. E, por fim, no caso do Agregado Artificial de Escória, embora seja um subproduto, seu processo envolve o consumo de cimento e energia, logo, também não se comporta como um bom material para minimizar os impactos ambientais;
- Para identificar os processos mais relevantes dos melhores traços de cada classe é preciso fazer uma ressalva dos traços que contêm cimento e dos traços que não contêm cimento. Para os traços da classe 1A (que contêm cimento), os processos mais relevantes são o transporte com 48% e a produção

de cimento com 36%. Para os traços da classe 1B e 2 (que não contêm cimento), o transporte passa a ser consideravelmente o processo mais relevante, pois carrega mais de 70% do impacto total. O impacto da escória torna-se relevante, pois a sua alocação de subproduto permite carregar uma parte do impacto da produção de aço. Porém, nos traços que apresentam uma representatividade tão grande do transporte, a responsabilidade da minimização dos impactos passam para uma análise da logística de transporte e dos modais de transporte utilizados. Nota-se que os traços que utilizaram materiais cimentícios suplementares (EGAF, PC, CV, CVLFC) alocados como substituição parcial ou total do cimento apresentaram os melhores desempenhos ambientais;

- Entre os piores traços das 3 classes de resistência, o traço pior, levando-se em consideração a pontuação única total e a intensidade de impacto total, foi o traço (Artigo 01) 550C-50CR-MK, com indicadores de 142,6 mPt e de 6,32 mPt/MPa, ou seja, a composição desse traço não ponderou o desempenho ambiental e técnico do concreto;
- Entre os melhores traços das 3 classes de resistência, o traço que mais se destacou, levando-se em consideração a pontuação única total e a intensidade de impacto total, foi o traço (Artigo 02) F 30 C 15, com indicadores de 53,78 mPt e de 0,93 mPt/MPa, ou seja, a composição desse traço ponderou de forma mais eficiente o desempenho ambiental e técnico do concreto;
- Do ponto de vista das categorias de danos (*midpoints*) Saúde Humana, Qualidade do Ecossistema, Mudanças Climáticas e Recursos, os traços de maior impacto de cada categoria apresentam uma distribuição do impacto total de 40%, 3%, 40% e 17%, respectivamente. Os danos à Saúde Humana se destacam com 40% como consequência das grandes emissões de particulados atrelados aos transportes e à produção do cimento. Já as Mudanças Climáticas também se destacam com 40% em consequência das grandes emissões de CO₂ decorrentes da produção do cimento;

- Do ponto de vista das categorias de danos (*Midpoints*) Saúde Humana, Qualidade do Ecossistema, Mudanças Climáticas e Recursos os traços de menor impacto de cada categoria apresentam uma distribuição do impacto total de 45%, 5%, 26% e 24%, respectivamente. Os danos à Saúde Humana se destacam com 45% por consequência das grandes emissões de particulados atrelados aos transportes.

4.3.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As cargas ambientais que permeiam a indústria do concreto são significativamente influenciadas pelo impacto ambiental resultante da utilização do cimento. Na maior parte dos traços de concreto estudados, o cimento representa um impacto total acima de 50% e uma taxa de emissões de gases de efeito estufa acima de 70%, exceto os traços que utilizam uma baixa quantidade de cimento. Ao considerar essas informações, é importante fazer uma análise de sensibilidade para estimar os efeitos sobre a incerteza e reforçar a fiabilidade dos resultados obtidos devido aos diferentes bancos de dados de ICV para cimento.

Este estudo realizou uma análise de sensibilidade nos traços que fazem parte da comparação entre as classes (item 4.3.5), baseada no estudo de Hossain *et al.* (2016), para avaliar os efeitos sobre o principal indicador associado ao consumo do cimento (Tipo A – 95% de clínquer), que é o potencial de aquecimento global, utilizando os seguintes cenários:

- **Cenário 1** (Cenário base da dissertação): Os dados de inventário foram coletados na base de dados *Ecoinvent* 3.2 e apresentam um potencial de aquecimento global de 0,94 Kg de CO₂ Eq. para 1 Kg de cimento;
- **Cenário 2**: Os dados de inventário foram coletados no artigo de Van Den Heede e De Belie (2012) e apresentam um potencial de aquecimento global de 0,84 Kg de CO₂ Eq. para 1 Kg de cimento;
- **Cenário 3**: Os dados de inventário foram coletados no artigo de Celik *et al.* (2015) e apresentam um potencial de aquecimento global de 1,14 Kg de CO₂ Eq. para 1 Kg de cimento;

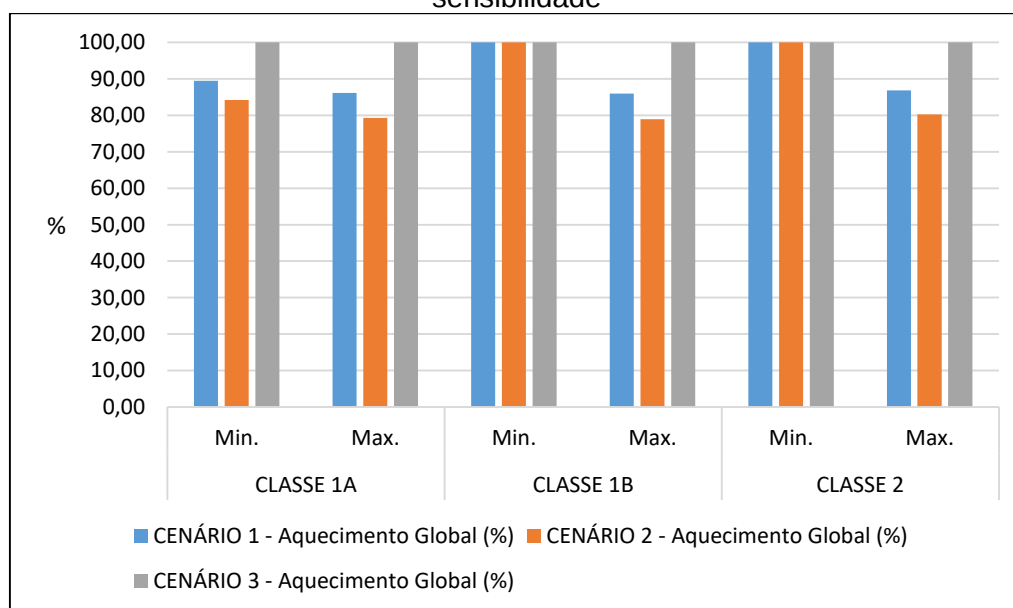
Com os cenários estabelecidos foi possível calcular o potencial de aquecimento global para cada situação e calcular a variação referente à utilização de 3 fontes de dados diferentes. O Quadro 25 e a Figura 26 apresentam os valores de aquecimento global referente à cada traço analisado nos 3 cenários de comparação.

Quadro 25 - Potencial de Aquecimento Global nos 3 Cenários da análise de sensibilidade

CLASSE RESISTÊNCIA	CLASSIFICAÇÃO	(ARTIGO) NOME DO TRAÇO	CENÁRIO 1 - Aquecimento Global (Kg CO ₂ Eq)	CENÁRIO 2 - Aquecimento Global (Kg CO ₂ Eq)	CENÁRIO 3 - Aquecimento Global (Kg CO ₂ Eq)
CLASSE 1A	Mín.	(Artigo 07) CFL 25-50-25	188,66	177,56	210,86
	Max.	(Artigo 01) 550C-50CR-MK	549,61	505,61	637,61
CLASSE 1B	Mín.	(Artigo 02) F 50 C 15	117,01	117,01	117,01
	Max.	(Artigo 01) 550C-30CR-MK	539,07	495,07	627,07
CLASSE 2	Mín.	(Artigo 02) F 30 C 15	124,49	124,49	124,49
	Max.	(Artigo 11) M6	582,31	538,31	670,31

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 26 - Comparação do potencial de Aquecimento Global nos 3 Cenários da análise de sensibilidade



Fonte: Elaborado pelo Autor

A análise de sensibilidade mostrou que existe uma pequena variação na comparação entre os traços referentes aos valores absolutos do potencial de aquecimento global para os traços que contêm cimento. Segundo o Quadro 25, para o traço “(Artigo 07) CFL 25-50-25”, os resultados revelaram uma variação de 188,66 Kg de CO₂Eq. (cenário 1) para 177,56 Kg de CO₂Eq. (cenário 2) para 210,86 Kg de CO₂Eq. (cenário 3), ou seja, -5,88% do cenário 1 para o cenário 2 e +11,76% do cenário 1 para o

cenário 3, como pode ser observado na Figura 26. Uma variação semelhante foi encontrada para os outros traços.

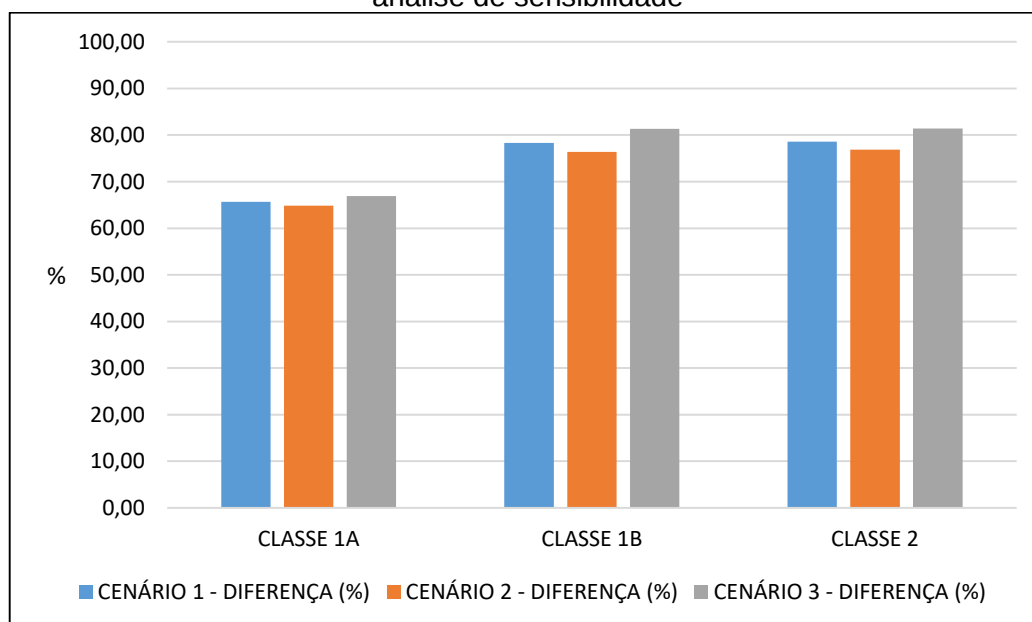
A variação também diminuiu ao fazer a comparação entre a diferença do potencial de aquecimento global do traço com maior desempenho ambiental para o traço de menor desempenho ambiental em cada uma das três classes de resistência, conforme consta no Quadro 26 e Figura 27.

Quadro 26 - Diferença de impacto ambiental nos 3 cenários da análise de sensibilidade

CLASSE RESISTÊNCIA	CLASSIFICAÇÃO	(ARTIGO) NOME DO TRAÇO	CENÁRIO 1 - DIFERENÇA (%)	CENÁRIO 2 - DIFERENÇA (%)	CENÁRIO 3 - DIFERENÇA (%)	VARIAÇÃO (%)
CLASSE 1A	Mín.	(Artigo 07) CFL 25-50-25	65,67	64,88	66,93	-0,79 (65,67) +1,26
	Max.	(Artigo 01) 550C-50CR-MK				
CLASSE 1B	Mín.	(Artigo 02) F 50 C 15	78,29	76,37	81,34	-1,92 (78,29) +3,05
	Max.	(Artigo 01) 550C-30CR-MK				
CLASSE 2	Mín.	(Artigo 02) F 30 C 15	78,62	76,87	81,43	-1,75 (78,62) +2,81
	Max.	(Artigo 11) M6				

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 27 - Comparação da variação do potencial de Aquecimento Global nos 3 Cenários da análise de sensibilidade



Fonte: Elaborado pelo Autor

Como pode ser observado no Quadro 26 e na Figura 27, para a classe 1A há uma diferença de impacto de 65,67% no cenário 1, 64,88% no cenário 2, e 66,93% no cenário 3. Tem uma variação de -0,79% na comparação do cenário 1 com o cenário

2 e uma variação de +1,26% do cenário 1 para o cenário 3. A variação permanece baixa para as classes 1B e 2 e não ultrapassa 3,05%.

Assim, para a categoria de impacto analisada, os dados de *output* com a quantificação dos impactos ambientais são sensíveis aos dados de *input* fornecido pelas referências que deram origem aos 3 cenários da análise de sensibilidade. A variação das diferenças é pequena, o que confere confiabilidade aos resultados finais.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS: FASE IV DA ACV

“Não é a terra que é frágil. Nós é que somos frágeis. A natureza tem resistido a catástrofes muito piores do que as que produzimos. Nada do que fazemos destruirá a natureza. Mas podemos facilmente nos destruir.”

James Lovelock

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS: FASE IV DA ACV

No capítulo anterior foram apresentadas e discutidas as fases I, II e III da ACV. Abordou-se a definição do objetivo e escopo, a análise de inventário (ICV) e a avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), bem como foi realizada uma análise de sensibilidade para testar a fiabilidade dos dados de inventário fazendo comparações com os resultados de outros estudos.

O objetivo do presente estudo foi desenvolver uma ACV *cradle-to-gate* (“do berço ao portão”) comparativa para analisar 162 traços de Concretos Autoadensáveis (CAA), separados em 3 classes de resistência, com altas proporções de incorporação de resíduos e subprodutos industriais em um cenário na cidade de Berkeley, Califórnia/EUA. Além de determinar o melhor desempenho ambiental no cenário proposto com uma unidade funcional de 1 m³ de concreto.

Este capítulo apresenta, a Fase IV da ACV com a interpretação dos resultados, na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são compatibilizadas de forma consistente com o objetivo e o escopo definidos, de modo a obter conclusões.

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

Com base no objetivo proposto foram traçadas as diretrizes e os parâmetros para aplicar a ACV, as simulações foram realizadas e os resultados obtidos. Após a análise e a discussão dos resultados observou-se que nas três classes de resistência analisadas as categorias de impactos (*midpoints*) mais afetadas foram os Efeitos Respiratórios Inorgânicos, o Aquecimento Global e a Energia Não Renovável; e nas categorias de danos (*endpoints*) as mais afetadas foram a Saúde Humana, as Mudanças climáticas e os Recursos Energéticos, estas responsáveis por mais de 90% do impacto total de cada traço. Isso se deve por consequência das altas emissões de partículas inorgânicas que afetam a saúde dos seres vivos, a emissão de grandes quantidades de gases do efeito estufa que causa mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global e o consumo de energia não renovável decorrente da queima de combustíveis fósseis. Os impactos são principalmente ocasionados em

decorrência da produção de cimento e dos transportes rodoviários para a logística dos materiais.

Dessa forma, concluiu-se que:

- a) Para Classe de Resistência 1A, que abrange os concretos com resistência moderada de 20 a 35 MPa, o traço de concreto com a melhor eficiência ambiental foi o (Artigo 07) CFL 25-50-25, com uma composição de 111,00 kg de Cimento Tipo A, 223,00 kg de Cinzas Volantes, 111,00 kg de Pó de Calcário, 155,75 kg de Água, 890,00 kg de Areia, 890,00 kg de Brita e 5,07 kg de Superplastificante alcançando 20,6 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Os índices da ACV que esse traço apresentou segundo o método de análise de impacto denominado IMPACT 2002+ foram de:
 - Em relação aos 3 principais *midpoints* foram encontrados valores de 0,22 kg de PM2.5 eq. para os Efeitos Respiratórios Inorgânicos, 188,66 kg de CO2 Eq. para o Aquecimento Global e 1786,58 MJ Primários para a Energia Não Renovável, sendo esses índices 57%, 65% e 55%, respectivamente, menores do que o traço de maior impacto;
 - Em relação à pontuação única dos 4 *endpoints* e a pontuação única total foram encontrados valores de 23,51 mPt para Saúde Humana, 2,25 mPt para Qualidade do Ecossistema, 19,05 mPt para Mudanças Climáticas e 11,79 mPt para os Recursos, totalizando 56,60 mPt de impacto total, sendo esses índices 58%, 44%, 65%, 55% e 60%, respectivamente, menores que o traço de maior impacto;
 - Em relação ao índice de Intensidade de Impacto total foi encontrado o valor de 2,75 mPt/MPa, sendo esse índice 56% menor que o traço de maior impacto;
- b) Para a Classe de Resistência 1B, que abrange os concretos com resistência moderada de 35 a 50 MPa, o traço de concreto com a melhor eficiência ambiental foi o (Artigo 02) F 50 C 15, com uma composição de 228,00 kg de Escória Granulada de Alto Forno, 228,00 kg de Cinzas Volantes, 68,00 kg de Cinzas Volantes de Leito Fluidizado Circulante, 157,00 kg de Água, 921,00 kg de Areia, 753,00 kg de Brita e 1,83 kg de Superplastificante, alcançando 42,00 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Os índices da ACV que esse traço

apresentou segundo o método de análise de impacto denominado IMPACT 2002+ foram de:

- Em relação aos 3 principais *midpoints* foram encontrados valores de 0,23 kg de PM2.5 eq. para os Efeitos Respiratórios Inorgânicos, 117,01 kg de CO2 Eq. para o Aquecimento Global e 1711,98 MJ Primários para a Energia Não Renovável, sendo esses índices 55%, 78% e 55%, respectivamente, menores do que o traço de maior impacto;
 - Em relação à pontuação única dos 4 endpoints e à pontuação única total foram encontrados valores de 24,57 mPt para Saúde Humana, 2,43 mPt para Qualidade do Ecossistema, 11,82 mPt para Mudanças Climáticas e 11,36 mPt para os Recursos, totalizando 50,18 mPt de impacto total sendo esses índices 54%, 38%, 78%, 54% e 63%, respectivamente, menores do que o traço de maior impacto;
 - Em relação ao índice de Intensidade de Impacto total foi encontrado o valor de 1,19 mPt/MPa, sendo esse índice 65% menor do que o traço de maior impacto;
- c) Para a Classe de Resistência 2, que abrange os concretos com resistência moderada de 50 a 80 MPa, o traço de concreto com a melhor eficiência ambiental foi o (Artigo 02) F 30 C 15, com uma composição de 230,00 kg de Escória Granulada de Alto Forno, 141,00 kg de Cinzas Volantes, 71,00 kg de Cinzas Volantes de Leito Fluidizado Circulante, 163,00 kg de Água, 921,00 kg de Areia, 753,00 kg de Brita e 1,90 kg de Superplastificante atingindo 58,00 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Os índices da ACV que esse traço apresentou segundo o método de análise de impacto denominado IMPACT 2002+ foram de:
- Em relação aos 3 principais *midpoints* foram encontrados valores de 0,25 kg de PM2.5 eq. para os Efeitos Respiratórios Inorgânicos, 124,49 kg de CO2 Eq. para o Aquecimento Global e 1796,42 MJ Primários para a Energia Não Renovável sendo esses índices 49%, 78% e 51%, respectivamente, menores do que o traço de maior impacto;
 - Em relação à pontuação única dos 4 endpoints e a pontuação única total foram encontrados valores de 26,55 mPt para Saúde Humana, 2,71 mPt para Qualidade do Ecossistema, 12,57 mPt para Mudanças Climáticas e 11,95 mPt

para os Recursos, totalizando 53,77 mPt de impacto total, sendo esses índices 51%, 47%, 78%, 51% e 62%, respectivamente menores do que o traço de maior impacto;

- Em relação ao índice de Intensidade de Impacto total foi encontrado o valor de 0,93 mPt/MPa sendo esse índice 58% menor do que o traço de maior impacto;

Entre os melhores traços das 3 classes de resistência o traço que mais se destacou, levando-se em consideração a pontuação única total e a intensidade de impacto total, foi o traço (Artigo 02) F 30 C 15, ou seja, a composição desse traço ponderou de forma mais eficiente o desempenho ambiental e técnico do concreto.

5.2. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

Como conclusões específicas, tem-se:

- Os ecoconcretos apresentam ganhos ambientais significativos que podem ajudar a minimizar os problemas da gestão de resíduos, reduzir o esgotamento dos recursos naturais e promover o consumo verde, principalmente quando incorporam resíduos ou subprodutos industriais classificados como Materiais Cimentícios suplementares na substituição do cimento;
- A pesquisa fornece um método para auxiliar a indústria da construção na escolha de concretos sustentáveis, minimizar os danos ambientais e promover a gestão sustentável dos resíduos, além de comparar os traços alternativos de ecoconcretos e assim promover a construção verde;
- Com a análise individual dos materiais verificou-se que o cimento apresenta o maior impacto ambiental, seguido pelo agregado artificial de escória e o metacaulim. O impacto do cimento e do metacaulim são altamente influenciados pelas etapas de extração, tratamento das matérias-primas e calcinação, pois esses processos são responsáveis pela emissão de grandes quantidades de particulados na atmosfera, gases estufa e consomem muita energia não renovável. O agregado artificial de escória se destaca por ser um

subproduto que recebe um tratamento, portanto necessita consumir energia elétrica e ainda utiliza o cimento em sua composição, o que agrava seu impacto. Assim, o consumo desses materiais deve ser diminuído ou evitado.

- Os materiais alocados como resíduos (lama vermelha do processo Bayer e resíduo de alumina) têm 100% do seu impacto advindo do transporte. Assim, a maior influência no impacto desses materiais é a distância e o modal de transporte utilizado. Embora a Sílica Ativa seja um subproduto industrial, o banco de dados Ecoinvent 3.2 não atribui impacto para os processos anteriores a sua geração, portanto, seu impacto também é 100% atribuído ao transporte.
- No caso do agregado artificial de escória, metacaulim, brita, cinzas, areia, pó de calcário e vidro reciclado, mais de 40% do impacto recebe influência do transporte. Já no caso do cimento, da borracha reciclada do resíduo de pneu, concreto reciclado, superplastificante, resíduo de polietileno e das fibras de resíduo de saco plástico, a influência do transporte fica abaixo de 20%;
- Os processos mais impactantes nos piores traços de cada classe de resistência foram disparadamente a produção de cimento, em média 57%, e o transporte, em média 20%, totalizando 77% do impacto total dos traços. As adições também representaram um alto impacto, sendo o Metacaulim, em média 11%, a Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu, em média 5%, e o Agregado Artificial de Escória, em média 19%. No caso do Metacaulim, a sua alocação como produto faz com que ele carregue todo o impacto ambiental desde a extração dos materiais referente à sua produção. Assim, não se comporta como um bom material para minimizar os impactos ambientais do concreto. No caso da Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu, embora seja um produto reciclado, o seu processo de reciclagem envolve muitas etapas e um alto consumo de energia. No caso do Agregado Artificial de Escória, embora seja um subproduto, seu processo envolve o consumo de cimento e energia, portanto, também não se comporta como um bom material para minimizar os impactos ambientais;

- Para o melhor traço da classe 1A (que contém cimento), os processos mais relevantes são o transporte com 48% e a produção de cimento com 36%. Para o melhor traço das classes 1B e 2 (que não contém cimento), o transporte passa a ser consideravelmente o processo mais relevante visto que carrega mais de 70% do impacto total. O impacto da escória passa a ser relevante, pois a sua alocação de subproduto permite carregar uma parte do impacto da produção de aço. Contudo, nos traços que apresentam uma representatividade tão grande do transporte a responsabilidade da minimização dos impactos passa para uma análise da logística de transporte e dos modais de transporte utilizados. Nota-se, assim, que os traços que utilizaram materiais cimentícios suplementares (EGAF, PC, CV, CVLFC) alocados como substituição parcial ou total do cimento apresentaram os melhores desempenhos ambientais;
- Com a análise de sensibilidade foi possível perceber que a diferença dos dados coletados em outras fontes é pequena quando comparado com os dados do *Ecoinvent* 3.2 utilizado nesta pesquisa, o que confere confiabilidade aos resultados finais.

5.3. INDICAÇÃO DE NOVAS TENDÊNCIAS DE ESTUDOS PARA ACV EM CAA

Ao ter por base o tema desta pesquisa é relevante sugerir alguns assuntos para estudos no futuro, os quais seriam enriquecedores para ACV de concretos:

- Expandir a presente pesquisa para uma abordagem *cradle-to-cradle* (“do berço ao berço”), considerando o cenário da geração de resíduos e reaproveitamento;
- Analisar os potenciais ganhos ambientais com a utilização dos resíduos desta pesquisa devido ao não descarte em aterros;
- Atrelar as análises de ACV em outros trabalhos que fazem estudos da incorporação de resíduos ou subprodutos industriais em concretos verificando a sua viabilidade ambiental;

- Elaborar novos inventários de ACV, bem como expandir os já existentes;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“A ciência é uma disposição de aceitar os fatos mesmo quando eles são opostos aos desejos”

Burrhus Frederic Skinner

REFERÊNCIAS

ACV BRASIL. Disponível em: <<http://www.acvbrasil.com.br/simapro/>>. Acessado em 13 de junho de 2015.

ALCOA. Disponível em: <<https://www.alcoa.com/global/en/home.asp>>. Acessado em 15 de março de 2016.

ALI, E. E.; AL-TERSAWY, S. H. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, n.35, p. 785–791, 2012.

ANDELA. Products Glass Pulverizer GPT-1. Disponível em: <<http://www.andelaproducts.com/equipment/glass-pulverizers/gpt-1/index.html>>. Acessado em 22 de março de 2016.

AÏTCIN, P-C. **Concreto de alto desempenho**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2000.

BARE, J.C. et al., Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. **International Journal of Life Cycle Assessment**, nº 5, p.319-326, 2000.

BARTOS, P. J. M.; SÖDERLIND, L. **Environment and ergonomics**. Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.5, p. 1-31, 2000.

BEHERA, M. et al., Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, nº 68, p. 501-516, 2014.

BJÖRKLUND, A.E.; FINNVEDEN, G. Life cycle assessment of a national policy proposal – the case of a Swedish waste incineration tax. **Waste Management**, nº 27, pp. 1046–1058, 2007.

BLANKENDAAL, T. et al. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. **Journal of Cleaner Production**, n. 66, p. 27-36, 2014.

BOSILJKOV, V. B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, n. 33, p. 1279-1286, 2003.

BOUZOUBAA, N.; LACHEMI, M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results, **Cement and Concrete Research**, n. 31, p. 413-420, 2001.

BRAS, A.; GOMES, V. LCA implementation in the selection of thermal enhanced mortars forenergetic rehabilitation of school buildings. **Energy and Buildings**, n. 92, p. 1-9, 2015.

BRIBIÁN, I. Z. et al. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, nº 44, p. 2510–2520, 2009.

BRIBIÁN, I.Z. et al. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco efficiency improvement potential. **Building and Environment**, n. 46, p. 1133-1140, 2010.

BROUWERS, H.J.H., RADIX, J.H., Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**. v.35, n.11, 21160-136, 2005.

BUYLE, M. et al. Life cycle assessment in the construction sector: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p.379–388, 2013.

CABEZA, L. F. et al., Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, nº 29, p. 394-416, 2014.

CARVALHO, J. **Análise de Ciclo de Vida ambiental aplicada a construção civil - Estudo de caso: Comparação entre Cimentos Portland com adição de resíduos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 104 p. 2002.

CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2012.

CC METALS AND ALLOYS. Disponível em: <<http://www.ccmetals.com>>. Acessado em 15 de março de 2016.

CELIK, K. et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement & Concrete Composites**, nº 56, p. 59–72, 2015.

CHAU, C.K.; LEUNG, T.M.W.Y. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, nº 143, p. 395-413, 2015.

CHAUHAN, M. K. et al. Life cycle assessment of sugar industry: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, nº7, p. 3445-3453, 2011.

CHEN, C. et al. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, nº 54, p. 1231–1240, 2010.

CHERUBINI, F. et al. LCA of magnesium production Technological overview and worldwide estimation of environmental burdens. **Resources, Conservation and Recycling**, nº 52, p. 1093-1100, 2008.

CLEARY, J. The incorporation of waste prevention activities into life cycle assessments of municipal solid waste management systems: methodological issues. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, nº 15, p. 579–589, 2010.

COSTA, M. S. V. O enfoque de ciclo de vida como estratégia para a gestão sustentável: um estudo de caso sobre pneus. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2007.

CREE, D. et al., Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review. **Construction and Building Materials**, nº 45, p. 208-223, 2013.

DE BRITO, F. G. J.; DA SILVA, D. C. Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. **Engineering Structures**, nº 59, p. 654-662, 2014.

DE LA PEÑA, B.R. Hormigón autocompactante: Nueva tecnología para la construcción con hormigón. **Revista Bit**, Chile, p. 41-42, Corporación de Desarrollo Tecnológico y Camara Chilena de la Construcción, jun. 2000a.

DIMOUNDI, A.; TOMPA, C. Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, p. 86–95, 2008.

DING, G.K.C. Sustainable construction – the role of environmental assessment tools. **Journal of Environmental Management**, nº 86, p. 451–64, 2008.

ECOINVENT. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/home.html>>. Acessado em 13 de junho de 2015.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Reino Unido: EFNARC, 2002, 32 p.

FAVA, J.A., Will the next 10 years be as productive in advancing life cycle approaches as the last 15 years? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, nº 11, p. 6–8, 2006.

FEIZ, R. et al. Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. **Journal of Cleaner Production**, n. xx, p. 1-10, 2014.

FINNVEDEN, G. et al. Life Cycle Assessment of energy from solid waste – part 1: general methodology and results. **Journal of Cleaner Production**, nº 13, p. 213-229, 2005.

GENTIL, E.C. et al. Environmental evaluation of municipal waste prevention **Waste Management**, nº 31, p. 2371–2379, 2011.

GENTIL, E.C. et al. Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. **Waste Management**, nº 30, pp. 2636–2648, 2010.

GESOGLU, M.; OZBAY, E. Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems, **Materials and Structures**, n. 40, p. 913–926, 2007.

GESOGLU, M. et al. Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete. **Journal of Hazardous Materials**, n. 235– 236, p. 352– 358, 2012

GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Estado del Arte del Hormigón Autocompactable y su Caracterización**, 2003, 64 p. Departamento de Ingeniería de la Construcción E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Informe C4745/1, 2003.

GIACOMETTI, M. (2008). **Estudo das propriedades reológicas do concreto autoadensável de alta resistência com fíler de escória de aciaria LD**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil da UFES, 2008.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J.J.L. Concreto auto-adensável: um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: 45º. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003, 15 p.

GOMES, P. C. C.. **Optimization and characterization of high-strength self compacting concrete**, 2002. 139 p. Tesis (Doctoral em Enginyeria) - Departament D'Enginyers de Camins, Canal i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GHERNOUTI, Y. et al. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). **Construction and Building Materials**, n. 82, p. 89–100, 2015.

GUINÉE, B. et al. Life cycle assessment: past, present, and future. **Environ, Science and Technology of Advanced Materials**, nº 45, p. 90-96, 2011.

GRDIC, Z. J. et al. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, n. 24, p. 1129–1133, 2010.

GREISSER, A.. **Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures. Reology, Phase Compositon, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems**. 2002. 162 p. Dissertation (degree of Doctor of Technical Sciences), Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2002.

GURSEL, A. P. et al. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. **Cement & Concrete Composites**, nº 51, p. 38–48, 2014.

GURSEL A. P.; HORVATH A. **GreenConcrete LCA Tool**. Universidade da Califórnia, Berkeley, 2012. Disponível em: <<http://greenconcrete.berkeley.edu/>>. Acessado em: 18 de dezembro de 2014.

HABERT, G.; D'ESPOINSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, n. 19, p. 1229-1238, 2011.

HABERT, G. et al. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, nº 54, pp. 364–376, 2010

HEATH, A.; PAINE, K.; MCMANUS, M. Minimising the global warming potential of clay based geopolymers. **Journal of Cleaner Production**. n. 78, p. 75-83, 2014.

HONG DONG, Y. et al. Substituting local data for overseas life cycle inventories - a case study of concrete products in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, nº 87, p. 414-422, 2015.

HOSSAIN, M. U. Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco blocks using LCA approach. **International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 21, p. 70–84, 2016.

HO, D. W. S.; SHEINN, A.M.M.; TAM, C.T. The sandwich concept of construction with SCC. **Cement and Concrete Research**, New York, n. 31, Pergamon, p. 1377-1381, 2001b.

HUNTZINGER, D.N.; EATMON, T.D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative Technologies. **Journal of Cleaner Production**, v.17, n.7, p. 668-67, 2009.

ILCD handbook, **Analysis of Existing Environmental Impact Assessment Methodologies for Use in Life Cycle Assessment (LCA)**, JRC European Commission, 1ª Edição, 2010. Disponível em: <<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>>. Acessado em: 18 de dezembro de 2014.

IMERYS. Disponível em: <<http://www.imerys-kaolin.com>>. Acessado em 15 de março de 2016.

INGRAO, C. et al., Life Cycle Inventory analysis of a precast reinforced concrete shed for goods storage. **Journal of Cleaner Production**, n° 79, p. 152-167, 2014.

INGRAO, C. et al. The use of basalt aggregates in the production of concrete for the prefabrication industry: Environmental impact assessment, interpretation and improvement. **Journal of Cleaner Production**, n° 75, p. 195-204, 2014.

International Organization for Standardization (ISO). **Environmental Management e Life Cycle Assessment e Requirements and Guidelines**, ISO 14.044, 2006.

International Organization for Standardization (ISO). **Environmental Management e Life Cycle Assessment - Life cycle impact assessment**, ISO 14.042, 2006.

International Organization for Standardization (ISO). **Environmental Management e Life Cycle Assessment - Objectives and scope definition and inventory analysis**, ISO 14.041, 2006.

International Organization for Standardization (ISO). **Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Frameworks**, ISO 14.040, 2006.

International Organization for Standardization (ISO). **Environmental management for concrete and concrete structures -- Part 1: General principles**, ISO 13.315-1, 2012.

International Organization for Standardization (ISO). **Environmental management for concrete and concrete structures -- Part 2: System boundary and inventory data**, ISO 13.315-2, 2014.

ISLAM, H. et al., Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n° 42, pp. 129-140, 2015.

ISMAIL, M.K.; HASSAN, A. A. A. Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber. **Journal of Cleaner Production**, n. 125, p. 282-295, 2016.

JOLLIET, O. et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **International Journal of LCA**, v. 8, n. 6, p. 324-330, 2003.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M-A. Chemical admixture-cement interactions : phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 20, n. 2-3, p. 87-101, 1998.

LOPPFFER, W. The role of SETAC in the development of LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 11, p. 116–22, 2006.

KOU, S.C.; POON, C.S. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. **Cement & Concrete Composites**, n. 31, p. 107–113, 2009.

KUA, H. W; KAMATH, S. An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. **Journal of Cleaner Production**, nº xx, p. 1-11, 2014.

LACHEMI, M.; HOUSSAIN, K.M.A.; LAMBROS, V.; NKINAMUBANZI, P-C.; BOUZOUBA, N. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, n.34, p.185-193, 2003.

LAFARGE NORTH AMERICA INC. Disponível em: <<http://www.nationalslag.org/slag-availability>>. Acessado em 15 de março de 2016.

LAM, P. et al. Environmental management system vs green specifications: How do they complement each other in the construction industry? **Journal of Environmental Management**, pp. 788-795, 2011.

LANER, D. RECHBERGER, H. Quantitative evaluation of waste prevention on the level of small and medium sized enterprises (SMEs), **Waste Management**, nº 29, p. 606–613, 2009.

LARRIVA, R.A. et al., A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort. **Energy and Buildings**, nº 70, pp. 333-342, 2014.

LAURENT, A. et al. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. **Waste Management**, nº 34, p. 573-588, 2014a.

LAURENT, A. et al. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part II: Methodological guidance for a better practice. **Waste Management**, nº 34, p. 589-606, 2014b.

LISBÔA, E. M.. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 115. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.

LIU, M. Incorporating ground glass in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, n. 25, p. 919–925, 2011.

LIU, R; POON, C. Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting Concrete. **Journal of Cleaner Production**, n. xx, p. 1-8, 2015.

LI, X. et al. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. **Building and Environment**, nº 45, p. 766-775, 2010.

LOFGREN, B. et al. Manufacturing actor's LCA. **Journal of Cleaner Production**, nº 19, p.2025-2033, 2011.

MANDA, B.M.K. et al. Innovative membrane filtration system for micropollutant removal from drinking water e prospective environmental LCA and its integration in business decisions. **Journal of Cleaner Production**, nº 72, pp. 153-166, 2014.

MANUEL, P. J. M.. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. 2005. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MARINKOVIC, S. et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, nº 30, p. 2255–2264, 2010.

MATIAS, D. et al. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Building Materials**, nº 44, p. 101-109, 2013.

MEHTA, P.K. Global concrete industry sustainability: tools for moving forward to cut carbon emissions. **Concrete International**, v.31, n. 2, p. 45-48, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e materiais**. Tradução de Cristina Borba. 3ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. ISBN 978-85-98576-12-1.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 7, 2016.

MOBERG, A. et al. Life Cycle Assessment of energy from solid waste – part 2: landfilling compared to other treatment methods. **Journal of Cleaner Production**, nº 13, pp. 231-240, 2005.

MONTEIRO, H.; FREIRE, F. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. **Energy and Buildings**, nº 47, p. 572–583, 2012.

MONKIZKHASREEN, M. et al. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review. **Sustainability Journal**, n. 1, p. 674-701. 2009.

MULLER, H. S. et al. Design and properties of sustainable concrete. **Procedia Engineering**, nº 95, p. 290-304, 2014.

NEHDI, M. L., Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art. **Construction and Building Materials**, nº 51, p. 372-382, 2014.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NGUYEN, H. et al. Engineering properties and durability of high-strength self-compacting concrete with no-cement SFC binder. **Construction and Building Materials**, n.106, p. 670–677, 2016.

NIERO, M. et al. Eco-efficient production of spring barley in a changed climate: A Life Cycle Assessment including primary data from future climate scenarios. **Agricultural Systems**, nº 136, p. 46-60, 2015.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: tecnologia e propriedades**. 2001. 198 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós – Graduação em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2001.

OOTEHEM, K. V.; XU, L. The life-cycle assessment of a single-storey retail building in Canada. **Building And Environment**, nº 49, p.212-226, 2012.

ORTIZ, O. et al. Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia. **Building and Environment**, pp. 584– 594, 2009.

ORTIZ, O. et al. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, nº 23, p. 28–39, 2009.

OZAWA-MEIDA, L. et al. Measuring carbon performance in a UK University through a consumption-based carbon footprint: De Montfort University case study. **Journal of Cleaner Production**, nº 56, p. 185-198, 2013.

PANDEY, D. et al. Carbon footprint: current methods of estimation, **Environmental Monitoring and Assessment**, nº 178, p. 135-160, 2011.

PENNINGTON, D. W. et al., Life Cycle Assessment (Part 2): Current impact assessment practice. **Environmental International**, nº 30, p. 721-739, 2004.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A. et al. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, n. 51, p. 113–120, 2014.

PICON. Disponível em: <<http://www.piconfrp.com/about-picon>>. Acessado em 15 de março de 2016.

PIZZOL, M. et al. Eco-toxicological impact of “metals” on the aquatic and terrestrial ecosystem: a comparison between eight different methodologies for life cycle impact assessment (LCIA). **Journal of Cleaner Production**, nº 19, p.687–698, 2011.

PRÉ CONSULTANTS. **Introduction to LCA with SimaPro**. 2016.

PROSINO. Plastic Granulator. Disponível em: <<http://www.sinoshredder.com/shredders/small-sized-plastic-granulator/>>. Acessado em 22 de março de 2016.

PROSKE, T. et al. Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents e mix design principles and laboratory tests. **Cement and Concrete Research**, nº 51, pp. 38-46, 2013.

RASHID, A.F.A; YUSOFF, S. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, nº 45, pp. 244-248, 2015.

RAHAL, K., Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, nº 42, p. 407-415, 2007.

REBITZER, G. et al. Life cycle assessment Part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. **Environment International**, nº 30, p. 701-720, 2004.

RECOLOGY SAN FRANCISCO. Disponível em: <<http://www.recologysf.com/>>. Acessado em 15 de março de 2016.

REPETTE, W.L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In:_____. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, v.2, cap.49, p. 1509-1550.

REZA, B. et al. Emergy-based life cycle assessment (Em-LCA) of multi-unit and single-family residential buildings in Canada. **International Journal of Sustainable Built Environment**, nº 3, p. 207-224, 2014.

RIBEIRO, P. H. Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio a avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados. **Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo**, 2009.

RIXOM, M.R.; MAILVAGANAM, N.P. **Chemical admixtures for concrete**. Third Edition. New York: E & FN Spon, 1999.437p.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Final report of RILEM TC 188-CSC: Casting of self compacting concrete. **Materials and Structures**, France, n. 39, p. 937-954, 2006.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states**: implications for high performance concretes. 2000. 189 p. Thesis

(Doctoral), Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica superior d'enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Barcelona, June, 2000.

SADRMOMTAZI, A. et al. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of selfcompacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, n. 112, p. 2363-2373, 2016.

SCHLAGBAUM, T. Economic Impact of Self-Consolidating Concrete (SCC) in Ready-Mixed Concrete. In: FIRST NORTH AMERICAN CONFERENCE ON THE DESIGN AND USE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE, 2002, Chicago. **Proceedings...** Chicago: Center for Advanced Cement-Based Materials, 2002.

SETO, K. E. et al. Criteria for the evaluation of life cycle assessment software packages and life cycle inventory data with application to concrete. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2016.

SELF – COMPACTING CONCRETE EUROPEAN PROJECT GROUP (SCCEPG). **The European Guidelines for Self Compacting Concrete. Specification, Production and Use**. Reino Unido: EFNARC, 2005. 63p.

SHERWANIA, A. F. et al. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, nº 14, p. 540–544, 2010.

SILICA FUME ASSOCIATION. Disponível em: <<http://www.silicafume.org/index.html>>. Acessado em 15 de março de 2016.

SILVA, J. G. D. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado)- Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2005.

SIMAPRO. **Faculty. Versão 8.2.0.0**. Desenvolvido pela PRéConsultants. 2016.

SPURLOCK POWER STATION - KENTUCKY POWER COOPERATIVES. Disponível em: <http://www.sourcewatch.org/index.php/Spurlock_Power_Station>. Acessado em 15 de março de 2016.

SUH, S.; HUPPES, G. Methods for Life Cycle Inventory of a product. **Journal of Cleaner Production**, 2005, nº 7, pp. 687-697.

STANISKIS, J. K.; VARZINSKAS, V. Life cycle based design and product development: application of LCA to Lithuanian Industry. **Environmental Research, Engineering and Management**, nº 54, pp. 43-53, 2010.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of recycled alumina as fine aggregate replacement in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, n. 47, p. 701–710, 2013.

TABORIANSKI, V.M.; PRADO, R.T.A. Comparative evaluation of the contribution of residential water heating systems to the variation of greenhouse gases stock in the atmosphere. **Building and Environment**, nº 39, p. 645–52, 2004.

TAKANO, A. et al. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. **Building and Environment**, nº 79, p. 20-30, 2014.

TURK, J. et al. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. **Waste Management**, n. 45, p. 194-205, 2015.

TUTIKIAN, B.F. **Método de dosagem para concretos auto-adensáveis**, 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VALIPOUR, M. et al. Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. **Journal of Cleaner Production**, nº 65, pp. 418-423, 2014.

VAN DEN, H. P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement & Concrete Composites**, nº 34, p. 431-442, 2012.

WENZHOU HERO INTERNATIONAL TRADE CO. LTD. **SJ-A90/120 recycling machine**. Disponível em: <[http://www.herowu.com/products/sj-a90120-recycling-machine-\(electric-control-drywet-grain-making-machine\)l-ID79.html](http://www.herowu.com/products/sj-a90120-recycling-machine-(electric-control-drywet-grain-making-machine)l-ID79.html)>. Acessado em 22 de março de 2016.

WHIRLSTON. Small Scale Tire Recycling Line. Disponível em: <<http://www.tirerecyclingmachines.com/product/Small-Scale-Tire-Recycling-Line.html>>. Acessado em 22 de março de 2016.

YAN, H. et al. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. **Building and Environment**, p. 949–955, 2010.

YUNG, W. H. et al. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, n. 41, p. 665–672, 2013.

ZHAO, H. et al. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, n. 95, p. 66-74, 2015.

ZHOU, J. et al. Environmental life cycle assessment of reverse osmosis desalination: The influence of different lifecycle impact assessment methods on the characterization results. **Desalination**, nº 1, p.227–236, 2011.

ZIMMERMANN, M. et al. Benchmarks for sustainable construction – a contribution to develop a standard. **Energy and Buildings**, n. 37, p. 1147–57, 2005.

APÊNDICES

***“Todo grande progresso da ciência resultou de uma nova audácia da
imaginação”***

John Dewey

APÊNDICE A

A. TRAÇOS DE CONCRETO DOS 15 ARTIGOS ANALISADOS

A1. Traços do artigo 1 (ISMAIL e HASSAN, 2016)

Quadro A1 - Traços do artigo 1 (ISMAIL e HASSAN, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	500C-0CR	500C-5CR	500C-10CR	500C-15CR	500C-20CR	500C-25CR	500C-30CR	500C-40CR
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Metacaulim (MC) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) [kg/m³]	0,00	17,90	35,80	53,80	71,70	89,60	107,50	143,30
Água (Ag) [kg/m³]	197,63	197,73	197,73	197,53	197,11	197,11	197,21	196,05
Areia (Ar) [kg/m³]	980,80	931,70	882,70	833,70	784,60	735,60	686,50	588,50
Brita (Br) [kg/m³]	686,50	686,50	686,50	686,50	686,50	686,50	686,50	686,50
Superplastificante (SP) [kg/m³]	2,37	2,37	2,37	2,37	2,89	2,89	2,89	3,95
Massa total da mistura [kg/m³]	2367,30	2336,20	2305,10	2273,90	2242,80	2211,70	2180,60	2118,30
Fck28dias [MPa]	52,95	44,54	42,09	37,35	30,69	28,83	24,73	17,66

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A1 (continuação) - Traços do artigo 1 (ISMAIL e HASSAN, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	550C-20CR	550C-30CR	550C-40CR	550C-20CR-MK	550C-30CR-MK	550C-40CR-MK	550C-50CR-MK	550C-20CR-SG
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	550,00	550,00	550,00	440,00	440,00	440,00	440,00	385,00
Metacaulim (MC) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	110,00	110,00	110,00	110,00	0,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	165,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) [kg/m³]	67,70	101,50	135,30	66,70	100,00	133,30	166,60	67,20
Água (Ag) [kg/m³]	218,16	218,26	217,47	214,74	214,74	213,42	211,05	218,16
Areia (Ar) [kg/m³]	740,70	648,10	555,50	729,60	638,40	547,20	456,00	735,20
Brita (Br) [kg/m³]	648,10	648,10	648,10	638,40	638,40	638,40	638,40	643,30
Superplastificante (SP) [kg/m³]	1,84	1,84	2,63	5,26	5,26	6,58	8,95	1,84
Massa total da mistura [kg/m³]	2226,50	2167,80	2109,00	2204,70	2146,80	2088,90	2031,00	2215,70
Fck28dias [MPa]	32,81	27,05	21,10	47,33	39,83	32,95	22,56	34,59

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A1 (continuação) - Traços do artigo 1 (ISMAIL e HASSAN, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	550C-30CR-SG	550C-40CR-SG	550C-20CR-FA	550C-30CR-FA	550C-40CR-FA	550C-30CR-MK-20	550C-40CR-MK-20	550C-50CR-MK-20
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	385,00	385,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00
Metacaulim (MC) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	110,00	110,00	110,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	165,00	165,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	0,00	0,00	110,00	110,00	110,00	0,00	0,00	0,00
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) [kg/m³]	100,70	134,30	66,40	99,60	132,80	100,00	133,30	166,60
Água (Ag) [kg/m³]	218,16	217,37	218,16	218,26	181,37	215,53	214,74	213,68
Areia (Ar) [kg/m³]	643,30	551,40	726,90	636,00	545,20	638,40	547,20	456,00
Brita (Br) [kg/m³]	643,30	643,30	636,00	636,00	636,00	638,40	638,40	638,40
Superplastificante (SP) [kg/m³]	1,84	2,63	1,84	1,84	2,63	4,47	5,26	6,32
Massa total da mistura [kg/m³]	2157,30	2099,00	2199,30	2141,70	2048,00	2146,80	2088,90	2031,00
Fck28dias [MPa]	30,64	20,75	34,15	31,02	20,58	35,63	30,26	21,25

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A1 (continuação) - Traços do artigo 1 (ISMAIL e HASSAN, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	550C-30CR-MK-MA	550C-40CR-MK-MA	550C-50CR-MK-MA	500C-40CR-VRC	500C-50CR-VRC	550C-40CR-VRC	550C-50CR-VRC	550C-40CR-MK-VRC
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	440,00	440,00	440,00	500,00	500,00	550,00	550,00	440,00
Metacaulim (MC) [kg/m³]	110,00	110,00	110,00	0,00	0,00	0,00	0,00	110,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) [kg/m³]	100,00	133,30	166,60	143,30	179,20	135,30	169,20	133,30
Água (Ag) [kg/m³]	214,74	214,47	212,11	199,43	199,25	219,53	219,15	216,50
Areia (Ar) [kg/m³]	638,40	547,20	456,00	588,50	490,40	555,50	463,00	547,20
Brita (Br) [kg/m³]	638,40	638,40	638,40	686,50	686,50	648,10	648,10	638,40
Superplastificante (SP) [kg/m³]	5,26	5,53	7,89	0,57	0,75	0,57	0,75	3,50
Massa total da mistura [kg/m³]	2146,80	2088,90	2031,00	2118,30	2056,10	2109,00	2050,20	2088,90
Fck28dias [MPa]	30,24	25,69	17,16	16,55	12,10	19,42	15,25	30,89

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A1 (continuação) - Traços do artigo 1 (ISMAIL e HASSAN, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	550C-50CR-MK-VRC
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	440,00
Metacaulim (MC) [kg/m³]	110,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	0,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	0,00
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) [kg/m³]	166,60
Água (Ag) [kg/m³]	216,00
Areia (Ar) [kg/m³]	456,00
Brita (Br) [kg/m³]	638,40
Superplastificante (SP) [kg/m³]	4,00
Massa total da mistura [kg/m³]	2031,00
Fck28dias [MPa]	22,20

Fonte: Elaborado pelo autor

A2. Traços do artigo 2 (NGUYEN *et al.*, 2016)

Quadro A2 - Traços do Artigo 2 (NGUYEN *et al.*, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	OPC	F 00 C 25	F 00 C 15	F 10 C 15	F 20 C 15	F 30 C 15	F 50 C 15
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m ³]	600,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m ³]	0,00	456,00	497,00	439,00	384,00	330,00	228,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m ³]	0,00	0,00	0,00	49,00	96,00	141,00	228,00
Cinzas Volantes de Leito Fluidizado Circulante (CVLFC) [kg/m ³]	0,00	114,00	75,00	73,00	72,00	71,00	68,00
Água (Ag) [kg/m ³]	180,00	171,00	171,00	168,00	165,00	163,00	157,00
Areia (Ar) [kg/m ³]	921,00	921,00	921,00	921,00	921,00	921,00	921,00
Brita (Br) [kg/m ³]	753,00	753,00	753,00	753,00	753,00	753,00	753,00
Superplastificante (SP) [kg/m ³]	3,00	2,00	2,00	1,97	1,93	1,90	1,83
Massa total da mistura [kg/m ³]	2457,00	2417,00	2419,00	2404,97	2392,93	2380,90	2356,83
Fck28dias [MPa]	68,00	66,00	62,00	68,00	63,00	58,00	42,00

Fonte: Elaborado pelo autor

A3. Traços do artigo 3 (SADRMOMTAZI *et al.*, 2016)

Quadro A3 - Traços do Artigo 3 (SADRMOMTAZI *et al.*, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	CONTROLE	C1	C2	C3	S1	S2	S3	F1
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m ³]	450,00	450,00	450,00	450,00	405,00	405,00	405,00	315,00
Sílica Ativa (SA) [kg/m ³]	0,00	0,00	0,00	0,00	45,00	45,00	45,00	0,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m ³]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	135,00
Resíduo de Polietileno Tereftalato (RPET) [kg/m ³]	0,00	36,10	72,20	108,30	36,10	72,20	108,30	36,10
Água (Ag) [kg/m ³]	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00
Areia (Ar) [kg/m ³]	850,00	813,90	777,80	741,70	813,90	777,80	741,70	813,90
Brita (Br) [kg/m ³]	770,00	770,00	770,00	770,00	770,00	770,00	770,00	770,00
Superplastificante (SP) [kg/m ³]	6,80	7,00	7,40	8,10	6,80	7,70	8,30	5,40
Massa total da mistura [kg/m ³]	2271,80	2272,00	2272,40	2273,10	2271,80	2272,70	2273,30	2270,40
Fck28dias [MPa]	36,19	22,03	20,25	18,70	33,77	28,82	21,44	26,79

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A3 (continuação) - Traços do Artigo 3
(SADRMOMTAZI *et al.*, 2016)

Nome do Traço no Artigo:	F2	F3
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m ³]	315,00	315,00
Sílica Ativa (SA) [kg/m ³]	0,00	0,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m ³]	135,00	135,00
Resíduo de Polietileno Tereftalato (RPET) [kg/m ³]	72,20	108,30
Água (Ag) [kg/m ³]	195,00	195,00
Areia (Ar) [kg/m ³]	777,80	741,70
Brita (Br) [kg/m ³]	770,00	770,00
Superplastificante (SP) [kg/m ³]	6,30	6,80
Massa total da mistura [kg/m ³]	2271,30	2271,80
Fck28dias [MPa]	22,30	19,04

Fonte: Elaborado pelo autor

A4. Traços do artigo 4 (LIU e POON, 2015)

Quadro A4 - Traços do Artigo 4 (LIU e POON, 2015)

Nome do Traço no Artigo:	RM 0	RM 10	RM 20	RM 30	RM 40
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	359,00	359,00	359,00	359,00	359,00
Lama Vermelha do Processo Bayer (LV) [kg/m³]	0,00	31,10	62,20	93,40	124,60
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	311,00	279,90	248,80	217,70	186,60
Água (Ag) [kg/m³]	178,00	178,00	178,00	178,00	178,00
Areia (Ar) [kg/m³]	635,00	635,00	635,00	635,00	635,00
Brita (Br) [kg/m³]	872,00	872,00	872,00	872,00	872,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	5,60	6,20	6,60	7,20	8,20
Massa total da mistura [kg/m³]	2360,60	2361,20	2361,60	2362,30	2363,40
Fck28dias [MPa]	80,50	81,00	81,00	82,00	83,00

Fonte: Elaborado pelo autor

A5. Traços do artigo 5 (GHERNOUTI *et al.*, 2015)

Quadro A5 - Traços do Artigo 5 (GHERNOUTI *et al.*, 2015)

Nome do Traço no Artigo:	RSCC	WFSCC 1 (2)	WFSCC 3 (2)	WFSCC 5 (2)	WFSCC 7 (2)	WFSCC 1 (4)	WFSCC 3 (4)	WFSCC 5 (4)
Cimento Portland EUA TIPO B (CPB) [kg/m³]	430,00	430,00	430,00	430,00	430,00	430,00	430,00	430,00
Fibra de Resíduo de Saco Plástico (FRSP) [kg/m³]	0,00	1,00	3,00	5,00	7,00	1,00	3,00	5,00
Pó de Calcário (PC) [kg/m³]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Água (Ag) [kg/m³]	174,00	174,00	174,00	174,00	174,00	174,00	174,00	174,00
Areia (Ar) [kg/m³]	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00
Brita (Br) [kg/m³]	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60
Massa total da mistura [kg/m³]	1304,60	1305,60	1307,60	1309,60	1311,60	1305,60	1307,60	1309,60
Fck28dias [MPa]	31,50	31,50	33,00	35,00	35,00	32,00	33,50	34,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A5 (continuação) - Traços do Artigo 5 (GHERNOUTI *et al.*, 2015)

Nome do Traço no Artigo:	WFSCC 7 (4)	WFSCC 1 (6)	WFSCC 3 (6)	WFSCC 5 (6)	WFSCC 7 (6)
Cimento Portland EUA TIPO B (CPB) [kg/m³]	430,00	430,00	430,00	430,00	430,00
Fibra de Resíduo de Saco Plástico (FRSP) [kg/m³]	7,00	1,00	3,00	5,00	7,00
Pó de Calcário (PC) [kg/m³]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Água (Ag) [kg/m³]	174,00	174,00	174,00	174,00	174,00
Areia (Ar) [kg/m³]	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00
Brita (Br) [kg/m³]	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60
Massa total da mistura [kg/m³]	1311,60	1305,60	1307,60	1309,60	1311,60
Fck28dias [MPa]	34,50	31,50	32,60	33,80	34,70

Fonte: Elaborado pelo autor

A6. Traços do artigo 6 (ZHAO *et al.* , 2015)

Quadro A6 - Traços do Artigo 6 (ZHAO *et al.* , 2015)

Nome do Traço no Artigo:	CONTROLE	FA 20	FA 30	FA 40	GGBFS 20	GGBFS 30	GGBFS 40
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	460,00	368,00	322,00	276,00	368,00	322,00	276,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	92,00	138,00	184,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	0,00	92,00	138,00	184,00	0,00	0,00	0,00
Água (Ag) [kg/m³]	161,00	161,00	161,00	161,00	161,00	161,00	161,00
Areia (Ar) [kg/m³]	693,81	693,81	693,81	693,81	693,81	693,81	693,81
Brita (Br) [kg/m³]	1085,20	1085,20	1085,20	1085,20	1085,20	1085,20	1085,20
Superplastificante (SP) [kg/m³]	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Massa total da mistura [kg/m³]	2401,11	2401,11	2401,11	2401,11	2401,11	2401,11	2401,11
Fck28dias [MPa]	69,00	67,00	59,00	56,30	58,70	62,00	67,50

Fonte: Elaborado pelo autor

A7. Traços do artigo 7 (CELIK *et al.* , 2015)

Quadro A7 - Traços do Artigo 7 (CELIK *et al.* , 2015)

Nome do Traço no Artigo:	CFL 100-0-0	CFL 85-0-15	CFL 75-0-25	CFL 70-30-0	CFL 50-50-0	CFL 55-30-15	CFL 45-40-15	CFL 35-50-15
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	461,00	389,00	342,00	317,00	224,00	248,00	202,00	156,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	136,00	225,00	135,00	179,00	223,00
Pó de Calcário (PC) [kg/m³]	0,00	69,00	114,00	0,00	0,00	68,00	67,00	67,00
Água (Ag) [kg/m³]	161,35	160,30	159,60	158,55	157,15	157,85	156,80	156,10
Areia (Ar) [kg/m³]	922,00	916,00	912,00	906,00	898,00	902,00	896,00	892,00
Brita (Br) [kg/m³]	922,00	916,00	912,00	906,00	898,00	902,00	896,00	892,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	6,59	6,55	6,02	6,30	5,12	5,14	4,61	4,46
Massa total da mistura [kg/m³]	2472,94	2456,85	2445,62	2429,85	2407,27	2417,99	2401,41	2390,56
Fck28dias [MPa]	53,90	43,20	33,60	51,00	41,60	37,50	33,90	26,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A7 (continuação) - Traços do Artigo 7 (CELIK *et al.* , 2015)

Nome do Traço no Artigo:	CFL 25-60-15	CFL 55-20-25	CFL 45-30-25	CFL 35-40-25	CFL 25-50-25
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	111,00	248,00	202,00	156,00	111,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	266,00	90,00	135,00	179,00	223,00
Pó de Calcário (PC) [kg/m³]	67,00	113,00	112,00	112,00	111,00
Água (Ag) [kg/m³]	155,40	157,85	157,15	156,45	155,75
Areia (Ar) [kg/m³]	888,00	902,00	898,00	894,00	890,00
Brita (Br) [kg/m³]	888,00	902,00	898,00	894,00	890,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	4,44	6,04	5,12	5,10	5,07
Massa total da mistura [kg/m³]	2379,84	2418,89	2407,27	2396,55	2385,82
Fck28dias [MPa]	20,60	36,30	31,50	28,90	20,60

Fonte: Elaborado pelo autor

A8. Traços do artigo 8 (PEREIRA-DE-OLIVEIRA et. al. , 2014)

Quadro A8 - Traços do Artigo 8 (PEREIRA-DE-OLIVEIRA et. al. , 2014)

Nome do Traço no Artigo:	SCC 0	SCC 20	SCC 40	SCC 100
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	284,90	284,90	284,90	284,90
Concreto Reciclado (CR) Brita [kg/m³]	0,00	149,60	299,30	808,50
Pó de Calcário (PC) [kg/m³]	370,20	370,20	370,20	370,20
Água (Ag) [kg/m³]	161,30	163,20	160,70	162,40
Areia (Ar) [kg/m³]	730,80	730,80	730,80	730,80
Brita (Br) [kg/m³]	807,90	646,30	484,80	0,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	3,40	4,80	4,60	6,00
Massa total da mistura [kg/m³]	2359,07	2359,07	2359,07	2359,07
Fck28dias [MPa]	54,00	54,00	53,00	51,00

Fonte: Elaborado pelo autor

A9. Traços do artigo 9 (SUA-IAM e MAKUL, 2013)

Quadro A9 - Traços do Artigo 9 (SUA-IAM e MAKUL, 2013)

Nome do Traço no Artigo:	1	2	3	4	5	6	7	8
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00
Resíduo de Alumina (RA) [kg/m³]	0,00	230,00	461,00	692,00	922,00	0,00	230,00	461,00
Água (Ag) [kg/m³]	171,00	171,00	171,00	171,00	171,00	202,00	202,00	202,00
Areia (Ar) [kg/m³]	922,00	692,00	461,00	230,00	0,00	922,00	692,00	461,00
Brita (Br) [kg/m³]	804,00	804,00	804,00	804,00	804,00	804,00	804,00	804,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	1,35	2,25	4,05	6,98	9,00	1,35	1,80	3,83
Massa total da mistura [kg/m³]	2348,35	2349,25	2351,05	2353,98	2356,00	2379,35	2379,80	2381,83
Fck28dias [MPa]	26,80	30,60	35,70	55,30	47,10	22,90	24,20	32,50

Fonte: Elaborado pelo autor

A9 (continuação) - Traços do Artigo 9 (SUA-IAM e MAKUL, 2013)

Nome do Traço no Artigo:	9	10	11	12	13	14	15	16
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	450,00	450,00	550,00	550,00	550,00	550,00	550,00	550,00
Resíduo de Alumina (RA) [kg/m³]	692,00	922,00	0,00	203,00	406,00	610,00	813,00	0,00
Água (Ag) [kg/m³]	202,00	202,00	209,00	209,00	209,00	209,00	209,00	248,00
Areia (Ar) [kg/m³]	230,00	0,00	813,00	610,00	407,00	203,00	0,00	813,00
Brita (Br) [kg/m³]	804,00	804,00	708,00	708,00	708,00	708,00	708,00	708,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	6,08	7,43	1,10	2,20	3,30	6,60	8,25	1,10
Massa total da mistura [kg/m³]	2384,08	2385,43	2281,10	2282,20	2283,30	2286,60	2288,25	2320,10
Fck28dias [MPa]	45,90	40,80	30,60	33,10	38,20	59,90	50,30	29,30

Fonte: Elaborado pelo autor

A9 (continuação) - Traços do Artigo 9 (SUA-IAM e MAKUL, 2013)

Nome do Traço no Artigo:	17	18	19	20
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	550,00	550,00	550,00	550,00
Resíduo de Alumina (RA) [kg/m³]	203,00	406,00	610,00	813,00
Água (Ag) [kg/m³]	248,00	248,00	248,00	248,00
Areia (Ar) [kg/m³]	610,00	407,00	203,00	0,00
Brita (Br) [kg/m³]	708,00	708,00	708,00	708,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	1,65	2,48	2,75	5,50
Massa total da mistura [kg/m³]	2320,65	2321,48	2321,75	2324,50
Fck28dias [MPa]	30,60	35,70	48,40	45,90

Fonte: Elaborado pelo autor

A10. Traços do artigo 10 (HER YUNG *et al.*, 2013)

Quadro A10 - Traços do Artigo 10 (HER YUNG *et al.*, 2013)

Nome do Traço no Artigo:	SCRC 0%	SCRC30 5%	SCRC30 10%	SCRC30 15%	SCRC30 20%	SCRC50 5%	SCRC50 10%	SCRC50 15%
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) [kg/m³]	0,00	16,29	32,58	48,87	65,16	16,29	32,58	48,87
Água (Ag) [kg/m³]	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00
Areia (Ar) [kg/m³]	885,00	840,75	796,50	752,25	708,00	840,75	796,50	752,25
Brita (Br) [kg/m³]	888,00	888,00	888,00	888,00	888,00	888,00	888,00	888,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80	7,80
Massa total da mistura [kg/m³]	2590,80	2562,84	2534,88	2506,92	2478,96	2562,84	2534,88	2506,92
Fck28dias [MPa]	32,07	28,97	24,89	26,90	22,80	30,94	23,53	23,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A10 (continuação) - Traços do Artigo 10 (HER YUNG *et al.*, 2013)

Nome do Traço no Artigo:	SCRC50 20%	SCRC3050 5%	SCRC3050 10%	SCRC3050 20%
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	300,00	300,00	300,00	300,00
Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) [kg/m³]	150,00	150,00	150,00	150,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	150,00	150,00	150,00	150,00
Borracha Reciclada de Resíduo de Pneu (BRRP) [kg/m³]	65,16	16,29	32,58	65,16
Água (Ag) [kg/m³]	210,00	210,00	210,00	210,00
Areia (Ar) [kg/m³]	708,00	840,75	796,50	708,00
Brita (Br) [kg/m³]	888,00	888,00	888,00	888,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	7,80	7,80	7,80	7,80
Massa total da mistura [kg/m³]	2478,96	2562,84	2534,88	2478,96
Fck28dias [MPa]	21,90	25,90	23,96	19,24

Fonte: Elaborado pelo autor

A11. Traços do artigo 11 GESOGLU *et al.*, 2012)

Quadro A11 - Traços do Artigo 11 (GESOGLU *et al.*, 2012)

Nome do Traço no Artigo:	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00
Agregado Artificial de Escória (AAE) [kg/m³]	0,00	130,00	261,00	392,00	523,00	656,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00
Água (Ag) [kg/m³]	176,00	176,00	176,00	176,00	176,00	176,00
Areia (Ar) [kg/m³]	792,00	792,00	793,00	793,00	795,00	797,00
Brita (Br) [kg/m³]	824,00	659,00	495,00	330,00	165,00	0,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	8,00	8,00	7,40	7,00	5,60	4,20
Massa total da mistura [kg/m³]	2350,00	2315,00	2282,40	2248,00	2214,60	2183,20
Fck28dias [MPa]	60,96	64,38	66,78	69,74	65,06	64,27

Fonte: Elaborado pelo autor

A12. Traços do artigo 12 (ALI e AL-TERSAWY, 2012)

Quadro A12 - Traços do Artigo 12 (ALI e AL-TERSAWY, 2012)

Nome do Traço no Artigo:	M1-350-0%	M2-350-10%	M3-350-20%	M4-350-30%	M5-350-40%	M6-350-50%	M7-400-0%	M8-400-10%
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	350,00	400,00	400,00
[kg/m³]	0,00	79,20	158,40	237,60	316,80	396,00	0,00	75,30
Sílica Ativa (SA) [kg/m³]	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	40,00	40,00
Água (Ag) [kg/m³]	140,00	140,00	140,00	140,00	140,00	140,00	160,00	160,00
Areia (Ar) [kg/m³]	936,00	842,40	748,80	655,20	561,60	468,00	890,00	801,00
Brita (Br) [kg/m³]	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00	936,00	890,00	890,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	5,78	5,01	4,62	4,62	4,24	4,24	7,92	7,48
Massa total da mistura [kg/m³]	2402,78	2387,61	2372,82	2358,42	2343,64	2329,24	2387,92	2373,78
Fck28dias [MPa]	46,30	43,50	41,50	40,40	38,20	35,60	62,20	59,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A12 (continuação) - Traços do Artigo 12 (ALI e AL-TERSAWY, 2012)

Nome do Traço no Artigo:	M9-400-20%	M10-400-30%	M11-400-40%	M12-400-50%	M13-450-0%	M14-450-10%	M15-450-20%	M16-450-30%
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	400,00	400,00	400,00	400,00	450,00	450,00	450,00	450,00
Vidro Reciclado (VR) Moído [kg/m³]	150,60	225,90	301,20	376,50	0,00	71,60	148,20	214,70
Sílica Ativa (SA) [kg/m³]	40,00	40,00	40,00	40,00	45,00	45,00	45,00	45,00
Água (Ag) [kg/m³]	160,00	160,00	160,00	160,00	180,00	180,00	180,00	180,00
Areia (Ar) [kg/m³]	712,00	623,00	534,00	445,00	846,00	761,40	676,80	592,20
Brita (Br) [kg/m³]	890,00	890,00	890,00	890,00	846,00	846,00	846,00	846,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	7,48	7,48	6,60	6,60	8,91	8,42	8,42	8,42
Massa total da mistura [kg/m³]	2360,08	2346,38	2331,80	2318,10	2375,91	2362,42	2354,42	2336,32
Fck28dias [MPa]	53,20	51,60	48,40	47,50	67,70	65,20	61,60	58,50

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro A12 (continuação) - Traços do Artigo 12 (ALI e AL-TERSAWY, 2012)

Nome do Traço no Artigo:	M17-450-40%	M18-450-50%
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	450,00	450,00
Vidro Reciclado (VR) Moído [kg/m³]	286,30	357,90
Sílica Ativa (SA) [kg/m³]	45,00	45,00
Água (Ag) [kg/m³]	180,00	180,00
Areia (Ar) [kg/m³]	507,60	423,00
Brita (Br) [kg/m³]	846,00	846,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	7,43	7,43
Massa total da mistura [kg/m³]	2322,33	2309,33
Fck28dias [MPa]	55,80	53,60

Fonte: Elaborado pelo autor

A13. Traços do artigo 13 (LIU, 2011)

Quadro A13 - Traços do Artigo 13 (LIU, 2011)

Nome do Traço no Artigo:	W0	W2.2	W4.3	G0	G2.2	G4.2
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	527,00	497,00	463,00	539,00	511,00	477,00
Vidro Reciclado (VR) Branco Moído [kg/m³]	0,00	53,00	104,00	0,00	0,00	0,00
Vidro Reciclado (VR) Verde Moído [kg/m³]	0,00	0,00	0,00	0,00	51,00	100,00
Água (Ag) [kg/m³]	182,00	183,00	186,00	178,00	178,00	181,00
Areia (Ar) [kg/m³]	755,00	719,00	684,00	755,00	722,00	689,00
Brita (Br) [kg/m³]	924,00	924,00	924,00	924,00	924,00	924,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	5,27	4,55	4,02	6,20	5,85	5,69
Massa total da mistura [kg/m³]	2393,27	2380,55	2365,02	2402,20	2391,85	2376,69
Fck28dias [MPa]	70,50	68,20	65,20	74,90	68,30	58,50

Fonte: Elaborado pelo autor

A14. Traços do artigo 14 (GRDIC et al., 2010)

Quadro A14 - Traços do Artigo 14 (GRDIC et al., 2010)

Nome do Traço no Artigo:	E - P0	P-50	P-100
Cimento Portland EUA TIPO C (CPC) [kg/m³]	409,60	409,60	409,60
Concreto Reciclado (CR) Brita [kg/m³]	0,00	429,60	859,20
Pó de Calcário (PC) [kg/m³]	260,00	260,00	260,00
Água (Ag) [kg/m³]	170,00	178,00	186,00
Areia (Ar) [kg/m³]	676,00	676,00	676,00
Brita (Br) [kg/m³]	859,20	429,60	0,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	4,00	4,00	4,00
Massa total da mistura [kg/m³]	2378,80	2386,80	2394,80
Fck28dias [MPa]	49,00	47,00	46,00

Fonte: Elaborado pelo autor

A15. Traços do artigo 15 (KOU e POON, 2009)

Quadro A15 - Traços do Artigo 15 (KOU e POON, 2009)

Nome do Traço no Artigo:	G0	G15	G30	G45
Cimento Portland EUA TIPO A (CPA) [kg/m³]	375,00	375,00	375,00	375,00
Cinzas Volantes (CV) [kg/m³]	125,00	125,00	125,00	125,00
Vidro Reciclado (VR) para Brita [kg/m³]	0,00	81,00	162,00	246,00
Vidro Reciclado (VR) para Areia [kg/m³]	0,00	19,00	38,00	54,00
Água (Ag) [kg/m³]	185,00	185,00	185,00	185,00
Areia (Ar) [kg/m³]	860,00	774,00	688,00	602,00
Brita (Br) [kg/m³]	822,00	802,00	782,00	762,00
Superplastificante (SP) [kg/m³]	8,88	8,57	8,36	8,15
Massa total da mistura [kg/m³]	2375,88	2369,57	2363,36	2357,15
Fck28dias [MPa]	67,40	66,40	64,60	61,70

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B

B1. RESULTADOS COMPLETOS DA ACV DA CLASSE DE RESISTÊNCIA 1A UTILIZANDO O SOTWARE SIMAPRO 8.2, MÉTODO DE ANÁLISE DE IMPACTO "IMPACT 2002+" E O BANCO DE DADOS ECOINVENT 3.2

Quadro B1 - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1A

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Não Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Radiação Ionizante (Bq C-14 Eq)	Depleção da Camada de Ozônio (Kg CFC-11 Eq)	Respiratórios Orgânicos (Kg C2H4 Eq)	Ecotoxicidade Aquática (Kg TEG Water)	Exotoxicidade Terrestre (Kg TEG Soil)	Acidificação / Nutrição terrestre (Kg SO2 Eq)	Ocupação do Solo (m2org.arable)	Acidificação Aquática (Kg SO2 Eq)	Eutrofização Aquática (Kg PO4-lim)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não Renovável (MJ Primary)
1	(Artigo 07) CFL 25-50-25	20,60	CLASSE 1 A (20-35)	2,26770570	1,96922560	0,22071817	1020,9520	0,00001584	0,06052313	7269,8496	2593,5855	5,18107170	4,13240140	0,87873537	0,01822645	188,6594	1786,5805
2	(Artigo 07) CFL 25-60-15	20,60	CLASSE 1 A (20-35)	2,32885180	1,97228830	0,22303470	1025,9261	0,00001599	0,06174833	7229,5367	2525,2767	5,29517720	4,11440110	0,89617393	0,01829271	190,2048	1803,2338
3	(Artigo 07) CFL 35-40-25	28,90	CLASSE 1 A (20-35)	2,45107020	2,39639920	0,23977511	1148,1635	0,00001674	0,06215552	8172,8237	2853,9377	5,43319280	4,19216490	0,93794272	0,02067132	227,8241	1929,6437
4	(Artigo 07) CFL 35-50-15	26,00	CLASSE 1 A (20-35)	2,51445630	2,39977500	0,24216848	1153,3978	0,00001690	0,06341927	8132,5782	2784,4751	5,55033110	4,17417210	0,95587180	0,02074307	229,4239	1947,0943
5	(Artigo 07) CFL 45-30-25	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	2,64079460	2,83334240	0,25932056	1278,4263	0,00001767	0,06385956	9095,6253	3118,7921	5,69358310	4,25291660	0,99890364	0,02317577	267,9089	2076,6392
6	(Artigo 07) CFL 45-40-15	33,90	CLASSE 1 A (20-35)	2,71290500	2,83899470	0,26189167	1284,9556	0,00001786	0,06521224	9063,8827	3052,8836	5,81296130	4,23738110	1,01746730	0,02328659	269,6771	2098,0724
7	(Artigo 05) RSCC	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	3,32262050	4,21349230	0,27477075	1558,9408	0,00001633	0,05215869	11057,2870	3348,7794	4,87113500	2,55481730	0,95851146	0,02989900	387,9763	2218,0631
8	(Artigo 05) WFSCC 1 (2)	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	3,33773070	4,21723000	0,27560584	1564,1033	0,00001636	0,05219261	11074,2370	3352,3614	4,87382100	2,55742120	0,95936375	0,02999358	388,2377	2222,2045
9	(Artigo 05) WFSCC 1 (6)	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	3,33773070	4,21723000	0,27560584	1564,1033	0,00001636	0,05219261	11074,2370	3352,3614	4,87382100	2,55742120	0,95936375	0,02999358	388,2377	2222,2045
10	(Artigo 05) WFSCC 1 (4)	32,00	CLASSE 1 A (20-35)	3,33773070	4,21723000	0,27560584	1564,1033	0,00001636	0,05219261	11074,2370	3352,3614	4,87382100	2,55742120	0,95936375	0,02999358	388,2377	2222,2045
11	(Artigo 05) WFSCC 3 (2)	33,00	CLASSE 1 A (20-35)	3,35284090	4,22096770	0,27644094	1569,2658	0,00001638	0,05222653	11091,1870	3355,9434	4,87650690	2,56002500	0,96021603	0,03008815	388,4991	2226,3459
12	(Artigo 05) WFSCC 3 (6)	32,60	CLASSE 1 A (20-35)	3,36795120	4,22470540	0,27727604	1574,4283	0,00001640	0,05226045	11108,1380	3359,5254	4,87919290	2,56262880	0,96106831	0,03018272	388,7604	2230,4873
13	(Artigo 05) WFSCC 3 (4)	33,50	CLASSE 1 A (20-35)	3,36795120	4,22470540	0,27727604	1574,4283	0,00001640	0,05226045	11108,1380	3359,5254	4,87919290	2,56262880	0,96106831	0,03018272	388,7604	2230,4873
14	(Artigo 05) WFSCC 5 (6)	33,80	CLASSE 1 A (20-35)	3,39817170	4,23218070	0,27894623	1584,7532	0,00001645	0,05232830	11142,0380	3366,6894	4,88456480	2,56783640	0,96277288	0,03037186	389,2832	2238,7702
15	(Artigo 05) WFSCC 5 (4)	34,00	CLASSE 1 A (20-35)	3,39817170	4,23218070	0,27894623	1584,7532	0,00001645	0,05232830	11142,0380	3366,6894	4,88456480	2,56783640	0,96277288	0,03037186	389,2832	2238,7702
16	(Artigo 05) WFSCC 5 (2)	35,00	CLASSE 1 A (20-35)	3,39817170	4,23218070	0,27894623	1584,7532	0,00001645	0,05232830	11142,0380	3366,6894	4,88456480	2,56783640	0,96277288	0,03037186	389,2832	2238,7702
17	(Artigo 05) WFSCC 7 (4)	34,50	CLASSE 1 A (20-35)	3,42839210	4,23965610	0,28061642	1595,0782	0,00001649	0,05239614	11175,9380	3373,8535	4,88993660	2,57304400	0,96447744	0,03056101	389,8059	2247,0530
18	(Artigo 05) WFSCC 7 (6)	34,70	CLASSE 1 A (20-35)	3,42839210	4,23965610	0,28061642	1595,0782	0,00001649	0,05239614	11175,9380	3373,8535	4,88993660	2,57304400	0,96447744	0,03056101	389,8059	2247,0530
19	(Artigo 05) WFSCC 7 (2)	35,00	CLASSE 1 A (20-35)	3,42839210	4,23965610	0,28061642	1595,0782	0,00001649	0,05239614	11175,9380	3373,8535	4,88993660	2,57304400	0,96447744	0,03056101	389,8059	2247,0530
20	(Artigo 03) F1	26,79	CLASSE 1 A (20-35)	3,40230550	3,90383110	0,30534640	1595,9178	0,00001964	0,06808451	11080,7000	3519,2222	6,23257930	3,99454210	1,13939110	0,02963224	366,5338	2448,7392
21	(Artigo 03) F2	22,30	CLASSE 1 A (20-35)	3,54283690	3,93593570	0,31072704	1631,0264	0,00001989	0,06874438	11213,1290	3550,1492	6,25450680	4,00580930	1,14687150	0,03038343	368,8825	2495,1223
22	(Artigo 03) F3	19,04	CLASSE 1 A (20-35)	3,65685100	3,96112050	0,31556743	1662,1989	0,00002007	0,06913394	11319,7130	3570,2734	6,26962610	4,00960750	1,15242290	0,03101587	370,7194	2529,4002
23	(Artigo 07) CFL 75-0-25	33,60	CLASSE 1 A (20-35)	3,27177210	4,17855100	0,32011127	1683,8107	0,00002067	0,06964204	11966,8040	3952,9196	6,50379550	4,46125720	1,18897670	0,03105401	391,0366	2550,1435
24	(Artigo 10) SCRC 0%	32,07	CLASSE 1 A (20-35)	3,99836700	4,31192320	0,35323993	1728,5956	0,00002299	0,08949840	13437,6970	4294,0928	7,47891890	4,93614840	1,36011270	0,03807772	381,7558	2810,1803
25	(Artigo 10) SCRC3050 5%	25,90	CLASSE 1 A (20-35)	4,10080060	4,33062880	0,35842475	1761,2942	0,00002308	0,08950597	13520,9030	4292,4429	7,48439880	4,92380390	1,36361340	0,03868355	383,1831	2832,9286
26	(Artigo 10) SCRC30 5%	28,97	CLASSE 1 A (20-35)	4,10080060	4,33062880	0,35842475	1761,2942	0,00002308	0,08950597	13520,9030	4292,4429	7,48439880	4,92380390	1,36361340	0,03868355	383,1831	2832,9286
27	(Artigo 10) SCRC50 5%	30,94	CLASSE 1 A (20-35)	4,10080060	4,33062880	0,35842475	1761,2942	0,00002308	0,08950597	13520,9030	4292,4429	7,48439880	4,92380390	1,36361340	0,03868355	383,1831	2832,9286
28	(Artigo 10) SCRC50 10%	23,53	CLASSE 1 A (20-35)	4,20323420	4,34933440	0,36360957	1793,9928	0,00002318	0,08951354	13604,1100	4290,7930	7,48987870	4,91145940	1,36711410	0,03928938	384,6104	2855,6769
29	(Artigo 10) SCRC3050 10%	23,96	CLASSE 1 A (20-35)	4,20323420	4,34933440	0,36360957	1793,9928	0,00002318	0,08951354	13604,1100	4290,7930	7,48987870	4,91145940	1,36711410	0,03928938	384,6104	2855,6769
30	(Artigo 10) SCRC30 10%	24,89	CLASSE 1 A (20-35)	4,20323420	4,34933440	0,36360957	1793,9928	0,00002318	0,08951354	13604,1100	4290,7930	7,48987870	4,91145940	1,36711410	0,03928938	384,6104	2855,6769
31	(Artigo 10) SCRC3050 15%	19,21	CLASSE 1 A (20-35)	4,30566780	4,36804000	0,36879439	1826,6914	0,00002327	0,08952110	13687,3170	4289,1432	7,49535860	4,89911490	1,37061480	0,03989521	386,0377	2878,4252
32	(																

Quadro B1 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1A

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Extração Mineral (MJ Surplus)	Cancerígenos (mPt)	Não Cancerígenos (mPt)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (mPt)	Radiação Ionizante (mPt)	Depleção da Camada de Ozônio (mPt)	Respiratórios Orgânicos (mPt)	Ecotoxicidade Aquática (mPt)	Exotoxicidade Terrestre (mPt)	Acidificação / Nutrição terrestre (mPt)	Ocupação do Solo (mPt)	Acidificação Aquática (mPt)	Eutrofização Aquática (mPt)	Aquecimento Global (mPt)
1	(Artigo 07) CFL 25-50-25	20,60	CLASSE 1 A (20-35)	4,53474110	0,89529021	0,77745026	21,78488400	0,03023039	0,00234490	0,01817691	0,02664109	1,49761410	0,39334696	0,32881518	0	0	19,05460100
2	(Artigo 07) CFL 25-60-15	20,60	CLASSE 1 A (20-35)	4,63358750	0,91943069	0,77865943	22,01352500	0,03037767	0,00236748	0,01854488	0,02649336	1,45817050	0,40200985	0,32738290	0	0	19,21068300
3	(Artigo 07) CFL 35-40-25	28,90	CLASSE 1 A (20-35)	4,64680960	0,96768251	0,94609842	23,66580300	0,03399712	0,00247883	0,01866717	0,02995013	1,64794930	0,41248800	0,33357056	0	0	23,01023100
4	(Artigo 07) CFL 35-50-15	26,00	CLASSE 1 A (20-35)	4,74928540	0,99270735	0,94743116	23,90202900	0,03415211	0,00250233	0,01904671	0,02980265	1,60783950	0,42138114	0,33213887	0	0	23,17181800
5	(Artigo 07) CFL 45-30-25	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	4,76490050	1,04258570	1,11860360	25,59494000	0,03785420	0,00261656	0,01917894	0,03333183	1,80088410	0,43225683	0,33840458	0	0	27,05879500
6	(Artigo 07) CFL 45-40-15	33,90	CLASSE 1 A (20-35)	4,88066740	1,07105490	1,12083510	25,84870800	0,03804754	0,00264361	0,01958519	0,03321551	1,76282660	0,44132002	0,33716841	0	0	27,23739100
7	(Artigo 05) RSCC	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	4,37451650	1,31177060	1,66348680	27,11987300	0,04616024	0,00241827	0,01566482	0,04052054	1,93368570	0,36981657	0,20328682	0	0	39,18560700
8	(Artigo 05) WFSCC 1 (2)	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	4,37763340	1,31773610	1,66496240	27,20229700	0,04631310	0,00242158	0,01567501	0,04058265	1,93575400	0,37002049	0,20349400	0	0	39,21200600
9	(Artigo 05) WFSCC 1 (6)	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	4,37763340	1,31773610	1,66496240	27,20229700	0,04631310	0,00242158	0,01567501	0,04058265	1,93575400	0,37002049	0,20349400	0	0	39,21200600
10	(Artigo 05) WFSCC 1 (4)	32,00	CLASSE 1 A (20-35)	4,37763340	1,31773610	1,66496240	27,20229700	0,04631310	0,00242158	0,01567501	0,04058265	1,93575400	0,37002049	0,20349400	0	0	39,21200600
11	(Artigo 05) WFSCC 3 (2)	33,00	CLASSE 1 A (20-35)	4,38075040	1,32370160	1,66643800	27,28472100	0,04646596	0,00242489	0,01568519	0,04064477	1,93782240	0,37022441	0,20370119	0	0	39,23840500
12	(Artigo 05) WFSCC 3 (6)	32,60	CLASSE 1 A (20-35)	4,38386740	1,32966710	1,66791370	27,36714500	0,04661882	0,00242821	0,01569538	0,04070688	1,93989080	0,37042832	0,20390837	0	0	39,26480300
13	(Artigo 05) WFSCC 3 (4)	33,50	CLASSE 1 A (20-35)	4,38386740	1,32966710	1,66791370	27,36714500	0,04661882	0,00242821	0,01569538	0,04070688	1,93989080	0,37042832	0,20390837	0	0	39,26480300
14	(Artigo 05) WFSCC 5 (6)	33,80	CLASSE 1 A (20-35)	4,39010130	1,34159820	1,67086500	27,53199300	0,04692454	0,00243483	0,01571576	0,04083111	1,94402750	0,37083616	0,20432274	0	0	39,31760000
15	(Artigo 05) WFSCC 5 (4)	34,00	CLASSE 1 A (20-35)	4,39010130	1,34159820	1,67086500	27,53199300	0,04692454	0,00243483	0,01571576	0,04083111	1,94402750	0,37083616	0,20432274	0	0	39,31760000
16	(Artigo 05) WFSCC 5 (2)	35,00	CLASSE 1 A (20-35)	4,39010130	1,34159820	1,67086500	27,53199300	0,04692454	0,00243483	0,01571576	0,04083111	1,94402750	0,37083616	0,20432274	0	0	39,31760000
17	(Artigo 05) WFSCC 7 (4)	34,50	CLASSE 1 A (20-35)	4,39633520	1,35352920	1,67381620	27,69684000	0,04723027	0,00244145	0,01573613	0,04095534	1,94816420	0,37124399	0,20473711	0	0	39,37039800
18	(Artigo 05) WFSCC 7 (6)	34,70	CLASSE 1 A (20-35)	4,39633520	1,35352920	1,67381620	27,69684000	0,04723027	0,00244145	0,01573613	0,04095534	1,94816420	0,37124399	0,20473711	0	0	39,37039800
19	(Artigo 05) WFSCC 7 (2)	35,00	CLASSE 1 A (20-35)	4,39633520	1,35352920	1,67381620	27,69684000	0,04723027	0,00244145	0,01573613	0,04095534	1,94816420	0,37124399	0,20473711	0	0	39,37039800
20	(Artigo 03) F1	26,79	CLASSE 1 A (20-35)	5,19695470	1,34323020	1,54123250	30,13768900	0,04725513	0,00290699	0,02044782	0,04060633	2,03210450	0,47317742	0,31784571	0	0	37,01991100
21	(Artigo 03) F2	22,30	CLASSE 1 A (20-35)	5,29208540	1,39871200	1,55390740	30,66875900	0,04829469	0,00294447	0,02064600	0,04109163	2,04996260	0,47484216	0,31874224	0	0	37,25713600
22	(Artigo 03) F3	19,04	CLASSE 1 A (20-35)	5,34681760	1,44372480	1,56385040	31,14650500	0,04921771	0,00297113	0,02076300	0,04148222	2,06158300	0,47599002	0,31904447	0	0	37,44266200
23	(Artigo 07) CFL 75-0-25	33,60	CLASSE 1 A (20-35)	5,20897950	1,29169560	1,64969190	31,59498200	0,04985763	0,00306017	0,02091559	0,04385355	2,28253440	0,49376815	0,35498224	0	0	39,49470000
24	(Artigo 10) SCRC 0%	32,07	CLASSE 1 A (20-35)	12,55050500	1,57855530	1,70234730	34,86478200	0,05118372	0,00340327	0,02687906	0,04924378	2,47953800	0,56779952	0,39276933	0	0	38,55733300
25	(Artigo 10) SCRC3050 5%	25,90	CLASSE 1 A (20-35)	12,55408300	1,61899610	1,70973220	35,37652300	0,05215192	0,00341717	0,02688133	0,04954870	2,47858530	0,56821556	0,39178708	0	0	38,70149100
26	(Artigo 10) SCRC30 5%	28,97	CLASSE 1 A (20-35)	12,55408300	1,61899610	1,70973220	35,37652300	0,05215192	0,00341717	0,02688133	0,04954870	2,47858530	0,56821556	0,39178708	0	0	38,70149100
27	(Artigo 10) SCRC50 5%	30,94	CLASSE 1 A (20-35)	12,55408300	1,61899610	1,70973220	35,37652300	0,05215192	0,00341717	0,02688133	0,04954870	2,47858530	0,56821556	0,39178708	0	0	38,70149100
28	(Artigo 10) SCRC50 10%	23,53	CLASSE 1 A (20-35)	12,55766100	1,65943690	1,71711720	35,88826500	0,05312013	0,00343108	0,02688360	0,04985362	2,47763260	0,56863159	0,39080483	0	0	38,84564900
29	(Artigo 10) SCRC3050 10%	23,96	CLASSE 1 A (20-35)	12,55766100	1,65943690	1,71711720	35,88826500	0,05312013	0,00343108	0,02688360	0,04985362	2,47763260	0,56863159	0,39080483	0	0	38,84564900
30	(Artigo 10) SCRC30 10%	24,89	CLASSE 1 A (20-35)	12,55766100	1,65943690	1,71711720	35,88826500	0,05312013	0,00343108	0,02688360	0,04985362	2,47763260	0,56863159	0,39080483	0	0	38,84564900
31	(Artigo 10) SCRC3050 15%	19,21	CLASSE 1 A (20-35)	12,56123900	1,69987760	1,72450220	36,40000700	0,05408833	0,00344499	0,02688587	0,05015854	2,47667990	0,56904763	0,38982257	0	0	38,98980700
32	(Artigo 10) SCRC50 15%	23,40	CLASSE 1 A (20-35)	12,56123900	1,69987760	1,72450220	36,40000700	0,05408833	0,00344499	0,02688587	0,05015854	2,47667990	0,56904763	0,38982257	0	0	38,98980700
33	(Artigo 10) SCRC30 15%	26,90	CLASSE 1 A (20-35)	12,56123900	1,69987760	1,72450220	36,40000700	0,05408833	0,00344499	0,02688587	0,05015854	2,47667990	0,56904763	0,38982257	0	0	38,98980700
34	(Artigo 10) SCRC3050 20%	19,24	CLASSE 1 A (20-35)	12,56481700	1,74031840	1,73188720	36,91174800	0,05505654	0,00345889	0,02688815	0,05046346	2,47572720	0,56946366	0,38884032	0	0	39,13396600
35	(Artigo 10) SCRC50 20%	21,90	CLASSE 1 A (20-35)	12,56481700	1,74031840	1,73188720	36,91174800	0,05505654	0,00345889	0,02688815	0,05046346	2,47572720	0,56946366	0,38884032	0	0	39,13396600
36	(Artigo 10) SCRC30 20%	22,80	CLASSE 1 A (20-35)	12,56481700	1,74031840	1,73188720	36,91174800	0,05505654	0,00345889	0,02688815	0,05046346	2,47572720	0,56946366	0,38884032	0	0	39,13396600
37	(Artigo 03) S1	33,77	CLASSE 1 A (20-35)	5,90905680	1,51099130	1,90049840	35,06312000	0,05613947	0,00329895	0,02280820	0,04819053	2,38913680	0,53532386	0,34115117	0	0	45,45497200
38	(Artigo 01) 550C-20CR-SG	34,59	CLASSE 1 A (20-35)	12,06102100	1,63880270	1,97449300	36,75835600	0,05705831	0,00319391	0,02374914	0,05310200	2,57262160	0,52711072	0,33077010	0	0	44,25967600
39	(Artigo 03) S2	28,82	CLASSE 1 A (20-35)	6,00418750	1,56647310	1,91317330	35,59418900	0,05717904	0,00333642	0,02300638	0,04867583	2,40699490	0,53698860	0,34204770	0	0	45,69219600
40	(Artigo 09) 7	24,20	CLASSE 1 A (20-35)	5,12475630	1,42612730	2,00851750	34,80237600	0,05654605	0,00318799	0,02108619	0,04912406	2,38501350	0,52622690	0,32283942	0	0	48,24092200
41	(Artigo 09) 8	32,50	CLASSE 1 A (20-35)	5,23933200	1,46981000	2,00888200	34,72423600	0,05658843	0,00320080	0,02118400	0,04901281	2,35146640	0,52413219	0,31436737	0	0	48,30600500
42	(Artigo 03) S3	21,44	CLASSE 1 A (20-35)	6,06901930	1,61410320	1,92379920	36,08526600	0,05813119	0,00336579	0,02314368	0,04909010	2,42017470	0,53826567	0,34249850	0	0	45,89064700
43	(Artigo 09) 2	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	5,17008980	1,43783310	2,01156080	34,86020400	0,05667271	0,00320009	0,02117724	0,04922938	2,39198360	0,52679752	0,32349812	0	0	48,29817000
44	(Artigo 01) 550C-30CR-SG	30,64	CLASSE 1 A (20-35)	12,06798500	1,72192620	1,98961010	37,80913600	0,05904682	0,00322229	0,02375226	0,05372597	2,57030260	0,52794356	0,32869684	0	0	44,55517400
45	(Artigo 09) 1	26,80	CLASSE 1 A (20-35)	5,16924830	1,42368470	2,01885560	35,08747300	0,05695719	0,00321765	0,02130741	0,04960562	2,44287030	0,53033200	0,33359935	0	0	48,37828200
46	(Artigo 09) 6	22,90	CLASSE 1 A (20-35)	5,16936300	1,42375660	2,01888560	35,08963400	0,05696165	0,00321772	0,02130769	0,04960685	2,44291770	0,53034287	0,33360924	0	0	48,37919500
47	(Artigo 01) 550C-20CR-FA	34,15	CLASSE 1 A (20-35)	5,30477610	1,66032810	2,02096650	36,49212400	0,05949318	0,00321906	0,02142226	0,05006906	2,39465280	0,51871778	0,31006290	0	0	48,08711000
48	(Artigo 01) 550C-40CR-SG	20,75	CLASSE 1 A (20-35)	12,15487300	1,82598520	2,01018840	38,96880000	0									

Quadro B1 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1A

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA			CATEGORIA DE DANOS (ENDPOINT CATEGORY)									Intensidade de Impacto Total (mPt/MPa)
				Energia Não Renovável (mPt)	Extração Mineral (mPt)	Saúde Humana (DALY)	Qualidade do Ecossistema (PDF*m2*yr)	Mudanças Climáticas (Kg CO2 Eq)	Recursos (MJ Primary)	Pontuação Única (mPt)	Saúde Humana (mPt)	Qualidade do Ecossistema (mPt)	Mudanças Climáticas (mPt)	Recursos (mPt)	
1	(Artigo 07) CFL 25-50-25	20,60	CLASSE 1 A (20-35)	11,75570000	0,02983860	0,00016673	30,77284000	188,6594	1791,1152	56,5949	23,5084	2,2464	19,0546	11,7855	2,75
2	(Artigo 07) CFL 25-60-15	20,60	CLASSE 1 A (20-35)	11,86527800	0,03048901	0,00016853	30,32954300	190,2048	1807,8674	57,0834	23,7629	2,2141	19,2107	11,8958	2,77
3	(Artigo 07) CFL 35-40-25	28,90	CLASSE 1 A (20-35)	12,69705600	0,03057601	0,00018181	33,20490400	227,8241	1934,2906	63,7965	25,6347	2,4240	23,0102	12,7276	2,21
4	(Artigo 07) CFL 35-50-15	26,00	CLASSE 1 A (20-35)	12,81188000	0,03125030	0,00018367	32,75564500	229,4239	1951,8435	64,3040	25,8979	2,3912	23,1718	12,8431	2,47
5	(Artigo 07) CFL 45-30-25	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	13,66428600	0,03135305	0,00019728	35,68325100	267,9089	2081,4041	71,1751	27,8158	2,6049	27,0588	13,6956	2,26
6	(Artigo 07) CFL 45-40-15	33,90	CLASSE 1 A (20-35)	13,80531600	0,03211479	0,00019930	35,26754100	269,6771	2102,9530	71,7502	28,1009	2,5745	27,2374	13,8374	2,12
7	(Artigo 05) RSCC	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	14,59485500	0,02878432	0,00021390	34,89465200	387,9763	2222,4376	86,5159	30,1594	2,5473	39,1856	14,6236	2,75
8	(Artigo 05) WFSCC 1 (2)	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	14,62210600	0,02880483	0,00021453	34,92946800	388,2377	2226,5821	86,6622	30,2494	2,5499	39,2120	14,6509	2,75
9	(Artigo 05) WFSCC 1 (6)	31,50	CLASSE 1 A (20-35)	14,62210600	0,02880483	0,00021453	34,92946800	388,2377	2226,5821	86,6622	30,2494	2,5499	39,2120	14,6509	2,75
10	(Artigo 05) WFSCC 1 (4)	32,00	CLASSE 1 A (20-35)	14,62210600	0,02880483	0,00021453	34,92946800	388,2377	2226,5821	86,6622	30,2494	2,5499	39,2120	14,6509	2,71
11	(Artigo 05) WFSCC 3 (2)	33,00	CLASSE 1 A (20-35)	14,64935600	0,02882534	0,00021517	34,96428400	388,4991	2230,7267	86,8084	30,3394	2,5524	39,2384	14,6782	2,63
12	(Artigo 05) WFSCC 3 (6)	32,60	CLASSE 1 A (20-35)	14,67660700	0,02884585	0,00021581	34,99910000	388,7604	2234,8712	86,9547	30,4295	2,5549	39,2648	14,7055	2,67
13	(Artigo 05) WFSCC 3 (4)	33,50	CLASSE 1 A (20-35)	14,67660700	0,02884585	0,00021581	34,99910000	388,7604	2234,8712	86,9547	30,4295	2,5549	39,2648	14,7055	2,60
14	(Artigo 05) WFSCC 5 (6)	33,80	CLASSE 1 A (20-35)	14,73110800	0,02888687	0,00021709	35,06873300	389,2832	2243,1603	87,2471	30,6095	2,5600	39,3176	14,7600	2,58
15	(Artigo 05) WFSCC 5 (4)	34,00	CLASSE 1 A (20-35)	14,73110800	0,02888687	0,00021709	35,06873300	389,2832	2243,1603	87,2471	30,6095	2,5600	39,3176	14,7600	2,57
16	(Artigo 05) WFSCC 5 (2)	35,00	CLASSE 1 A (20-35)	14,73110800	0,02888687	0,00021709	35,06873300	389,2832	2243,1603	87,2471	30,6095	2,5600	39,3176	14,7600	2,49
17	(Artigo 05) WFSCC 7 (4)	34,50	CLASSE 1 A (20-35)	14,78560900	0,02892789	0,00021837	35,13836500	389,8059	2251,4494	87,5396	30,7896	2,5651	39,3704	14,8145	2,54
18	(Artigo 05) WFSCC 7 (6)	34,70	CLASSE 1 A (20-35)	14,78560900	0,02892789	0,00021837	35,13836500	389,8059	2251,4494	87,5396	30,7896	2,5651	39,3704	14,8145	2,52
19	(Artigo 05) WFSCC 7 (2)	35,00	CLASSE 1 A (20-35)	14,78560900	0,02892789	0,00021837	35,13836500	389,8059	2251,4494	87,5396	30,7896	2,5651	39,3704	14,8145	2,50
20	(Artigo 03) F1	26,79	CLASSE 1 A (20-35)	16,11270400	0,03419596	0,00023470	39,22923200	366,5338	2453,9361	89,1233	33,0928	2,8637	37,0199	16,1469	3,33
21	(Artigo 03) F2	22,30	CLASSE 1 A (20-35)	16,41790500	0,03482192	0,00023896	39,51559800	368,8825	2500,4144	90,2878	33,6933	2,8846	37,2571	16,4527	4,05
22	(Artigo 03) F3	19,04	CLASSE 1 A (20-35)	16,64345300	0,03518206	0,00024274	39,69999500	370,7194	2534,7470	91,2464	34,2270	2,8981	37,4427	16,6786	4,79
23	(Artigo 07) CFL 75-0-25	33,60	CLASSE 1 A (20-35)	16,77994400	0,03427509	0,00024546	43,49504500	391,0366	2555,3525	94,0943	34,6102	3,1751	39,4947	16,8142	2,80
24	(Artigo 10) SCRC 0%	32,07	CLASSE 1 A (20-35)	18,49098600	0,08258232	0,00027111	47,79932400	381,7558	2822,7308	98,8474	38,2272	3,4894	38,5573	18,5736	3,08
25	(Artigo 10) SCRC3050 5%	25,90	CLASSE 1 A (20-35)	18,64067000	0,08260587	0,00027509	47,78269400	383,1831	2845,4827	99,7006	38,7877	3,4881	38,7015	18,7233	3,85
26	(Artigo 10) SCRC30 5%	28,97	CLASSE 1 A (20-35)	18,64067000	0,08260587	0,00027509	47,78269400	383,1831	2845,4827	99,7006	38,7877	3,4881	38,7015	18,7233	3,44
27	(Artigo 10) SCRC50 5%	30,94	CLASSE 1 A (20-35)	18,64067000	0,08260587	0,00027509	47,78269400	383,1831	2845,4827	99,7006	38,7877	3,4881	38,7015	18,7233	3,22
28	(Artigo 10) SCRC50 10%	23,53	CLASSE 1 A (20-35)	18,79035400	0,08262941	0,00027907	47,76606400	384,6104	2868,2346	100,5538	39,3483	3,4869	38,8456	18,8730	4,27
29	(Artigo 10) SCRC3050 10%	23,96	CLASSE 1 A (20-35)	18,79035400	0,08262941	0,00027907	47,76606400	384,6104	2868,2346	100,5538	39,3483	3,4869	38,8456	18,8730	4,20
30	(Artigo 10) SCRC30 10%	24,89	CLASSE 1 A (20-35)	18,79035400	0,08262941	0,00027907	47,76606400	384,6104	2868,2346	100,5538	39,3483	3,4869	38,8456	18,8730	4,04
31	(Artigo 10) SCRC3050 15%	19,21	CLASSE 1 A (20-35)	18,94003800	0,08265295	0,00028304	47,74943400	386,0377	2890,9864	101,4070	39,9088	3,4857	38,9898	19,0227	5,28
32	(Artigo 10) SCRC50 15%	23,40	CLASSE 1 A (20-35)	18,94003800	0,08265295	0,00028304	47,74943400	386,0377	2890,9864	101,4070	39,9088	3,4857	38,9898	19,0227	4,33
33	(Artigo 10) SCRC30 15%	26,90	CLASSE 1 A (20-35)	18,94003800	0,08265295	0,00028304	47,74943400	386,0377	2890,9864	101,4070	39,9088	3,4857	38,9898	19,0227	3,77
34	(Artigo 10) SCRC3050 20%	19,24	CLASSE 1 A (20-35)	19,08972200	0,08267650	0,00028702	47,73280400	387,4650	2913,7383	102,2602	40,4694	3,4845	39,1340	19,1724	5,31
35	(Artigo 10) SCRC50 20%	21,90	CLASSE 1 A (20-35)	19,08972200	0,08267650	0,00028702	47,73280400	387,4650	2913,7383	102,2602	40,4694	3,4845	39,1340	19,1724	4,67
36	(Artigo 10) SCRC30 20%	22,80	CLASSE 1 A (20-35)	19,08972200	0,08267650	0,00028702	47,73280400	387,4650	2913,7383	102,2602	40,4694	3,4845	39,1340	19,1724	4,49
37	(Artigo 03) S1	33,77	CLASSE 1 A (20-35)	18,57198100	0,03888159	0,00027345	45,39455200	450,0492	2828,3986	105,9365	38,5569	3,3138	45,4550	18,6109	3,14
38	(Artigo 01) 550C-20CR-SG	34,59	CLASSE 1 A (20-35)	18,15084000	0,07936152	0,00028692	47,72060800	438,2146	2770,5473	106,4291	40,4557	3,4836	44,2597	18,2302	3,08
39	(Artigo 03) S2	28,82	CLASSE 1 A (20-35)	18,87718200	0,03950755	0,00027771	45,68091800	452,3980	2874,8768	107,1010	39,1574	3,3347	45,6922	18,9167	3,72
40	(Artigo 09) 7	24,20	CLASSE 1 A (20-35)	18,02257700	0,03372090	0,00027176	44,97539500	477,6329	2744,1182	107,8983	38,3178	3,2832	48,2409	18,0563	4,46
41	(Artigo 09) 8	32,50	CLASSE 1 A (20-35)	18,22923600	0,03447481	0,00027152	44,36957200	478,2773	2775,6400	108,0926	38,2839	3,2390	48,3060	18,2637	3,33
42	(Artigo 03) S3	21,44	CLASSE 1 A (20-35)	19,12264300	0,03993415	0,00028162	45,89080800	454,3629	2912,2458	108,1111	39,7078	3,3500	45,8906	19,1626	5,04
43	(Artigo 09) 2	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	18,11134600	0,03401919	0,00027227	45,08915900	478,1997	2757,6542	108,1257	38,3906	3,2915	48,2982	18,1454	3,53
44	(Artigo 01) 550C-30CR-SG	30,64	CLASSE 1 A (20-35)	18,45768500	0,07940734	0,00029508	47,68039700	441,1403	2817,1873	108,1796	41,6067	3,4807	44,5552	18,5371	3,53
45	(Artigo 09) 1	26,80	CLASSE 1 A (20-35)	18,12884900	0,03401365	0,00027384	45,97818100	478,9929	2760,3135	108,5091	38,6115	3,3564	48,3783	18,1629	4,05
46	(Artigo 09) 6	22,90	CLASSE 1 A (20-35)	18,12968900	0,03401441	0,00027386	45,97913200	479,0019	2760,4413	108,5131	38,6138	3,3565	48,3792	18,1637	4,74
47	(Artigo 01) 550C-20CR-FA	34,15	CLASSE 1 A (20-35)	18,62519400	0,03490543	0,00028551	44,84250100	476,1100	2835,8814	110,2783	40,2576	3,2735	48,0871	18,6601	3,23
48	(Artigo 01) 550C-40CR-SG	20,75	CLASSE 1 A (20-35)	18,92303500	0,07997907	0,00030421	47,84326100	445,0884	2887,9961	110,3429	42,8934	3,4926	44,9539	19,0030	5,32
49	(Artigo 03) C1	22,03	CLASSE 1 A (20-35)	19,14088200	0,03713365	0,00028027	46,59383600	484,9588	2914,5921	111,0787	39,5185	3,4014	48,9808	19,1780	5,04
50	(Artigo 03) C2	20,25	CLASSE 1 A (20-35)	19,34651800	0,03742733	0,00028394	46,75274200	486,6677	2945,8883	111,9859	40,0356	3,4130	49,1534	19,3839	5,53
51	(Artigo 01) 550C-30CR-FA	31,02	CLASSE 1 A (20-35)	18,92948300	0,03495135	0,00029361	44,80383100	479,0114	2882,1329	112,0139	41,3986	3,2707	48,3802	18,9644	3,61
52	(Artigo 03) C3	18,70	CLASSE 1 A (20-35)	19,61189200	0,03792038	0,00028796	46,98812300	488,7606	2986,2937	113,0475	40,6027	3,4301	49,3648	19,6498	6,05

Fonte: Adaptado do SimaPro 8.2

Quadro B1 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1A

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Não Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Radiação Ionizante (Bq C-14 Eq)	Depleção da Camada de Ozônio (Kg CFC-11 Eq)	Respiratórios Orgânicos (Kg C2H4 Eq)	Ecotoxicidade Aquática (Kg TEG Water)	Exotoxicidade Terrestre (Kg TEG Soil)	Acidificação / Nutrificação terrestre (Kg SO2 Eq)	Ocupação do Solo (m2org.arable)	Acidificação Aquática (Kg SO2 Eq)	Eutrofização Aquática (Kg PO4-lim)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não-Renovável (MJ Primary)
53	(Artigo 01) 550C-40CR-FA	20,58	CLASSE 1 A (20-35)	4,67502160	5,20852350	0,39187864	2149,9757	0,00002227	0,07188498	14051,4590	4160,6795	6,86759670	3,86002740	1,31229850	0,04007301	482,9141	2946,8384
54	(Artigo 01) 500C-20CR	30,69	CLASSE 1 A (20-35)	4,44432900	5,70105260	0,39683309	2201,0873	0,00002308	0,07311177	14936,9880	4547,6651	7,14825380	4,05082060	1,37170880	0,04106046	528,9943	3040,0449
55	(Artigo 01) 500C-25CR	28,83	CLASSE 1 A (20-35)	4,55684200	5,72153290	0,40252355	2236,9812	0,00002318	0,07311792	15028,0670	4545,5917	7,15415010	4,03697620	1,37553210	0,04172557	530,5587	3064,9795
56	(Artigo 01) 500C-30CR	24,73	CLASSE 1 A (20-35)	4,66934380	5,74199380	0,40821227	2272,8659	0,00002328	0,07312349	15119,0540	4543,4494	7,16001380	4,02305780	1,37934930	0,04239052	532,1221	3089,8980
57	(Artigo 01) 500C-40CR-VRC	16,55	CLASSE 1 A (20-35)	4,74058230	5,74282540	0,41646125	2321,8352	0,00002306	0,07156810	15151,3370	4476,6526	7,13232890	3,95205770	1,37581150	0,04303210	532,2827	3069,5658
58	(Artigo 09) 17	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	4,20505840	6,05164310	0,39569728	2182,0689	0,00002356	0,07530933	15408,1820	4649,6165	7,51223340	4,03793980	1,43383810	0,04071650	565,7926	3077,8704
59	(Artigo 09) 12	33,10	CLASSE 1 A (20-35)	4,24129060	6,06106210	0,39641260	2187,2918	0,00002366	0,07567982	15443,2950	4664,3670	7,52141460	4,04805320	1,43643010	0,04087739	566,4851	3094,3545
60	(Artigo 01) 500C-40CR	17,66	CLASSE 1 A (20-35)	4,96463410	5,80128900	0,42102405	2355,0785	0,00002368	0,07385206	15369,6870	4567,9267	7,18984300	4,01515710	1,39210590	0,04403536	536,6070	3171,8412
61	(Artigo 09) 11	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	4,18939780	6,07208250	0,39803208	2192,7640	0,00002371	0,07585581	15514,1630	4733,8932	7,55730230	4,15439110	1,44150370	0,04082521	566,7940	3087,4523
62	(Artigo 09) 16	29,30	CLASSE 1 A (20-35)	4,18962690	6,07217810	0,39805963	2192,9532	0,00002371	0,07585699	15514,5860	4733,9965	7,55748240	4,15454750	1,44156400	0,04082760	566,8054	3087,6129
63	(Artigo 01) 500C-50CR-VRC	12,10	CLASSE 1 A (20-35)	4,97818920	5,78704810	0,42812008	2395,6106	0,00002330	0,07170306	15345,7940	4477,4751	7,14727520	3,92778090	1,38435800	0,04441973	535,6524	3125,0495
64	(Artigo 01) 550C-20CR	32,81	CLASSE 1 A (20-35)	4,65334350	6,16308880	0,41654559	2322,4347	0,00002395	0,07522691	15868,4490	4781,4218	7,44642160	4,04254070	1,43877540	0,04338041	571,8411	3179,5215
65	(Artigo 01) 550C-30CR	27,05	CLASSE 1 A (20-35)	4,86578940	6,20174650	0,42728934	2390,2047	0,00002414	0,07523809	16040,3610	4777,4549	7,45753070	4,01634300	1,44599020	0,04463619	574,7943	3226,5923
66	(Artigo 01) 550C-40CR-VRC	19,42	CLASSE 1 A (20-35)	4,99405070	6,21843730	0,43631875	2445,4844	0,00002410	0,07439110	16130,2300	4739,1929	7,44702990	3,96643680	1,44708270	0,04551501	576,1227	3235,2346
67	(Artigo 01) 550C-40CR	21,10	CLASSE 1 A (20-35)	5,13060300	6,25406890	0,43909962	2465,7451	0,00002448	0,07578310	16263,3080	4794,8216	7,48208290	4,00489380	1,45701360	0,04612647	578,7582	3297,5681
68	(Artigo 01) 550C-50CR-VRC	15,25	CLASSE 1 A (20-35)	5,21909990	6,26039580	0,44734389	2515,2604	0,00002433	0,07452608	16314,6260	4740,3331	7,46135800	3,94379900	1,45520950	0,04682852	579,3189	3287,9521
69	(Artigo 01) 550C-30CR-MK-MA	30,24	CLASSE 1 A (20-35)	6,28444840	5,75713830	0,49552979	2709,2772	0,00002890	0,09547844	16719,7850	4918,8301	8,63967280	4,97343380	1,69598280	0,04914274	539,0742	3810,3451
70	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-VRC	30,89	CLASSE 1 A (20-35)	6,37708920	5,76478750	0,50373927	2758,7375	0,00002877	0,09430034	16775,4840	4867,4154	8,62067940	4,91478960	1,69460810	0,04985758	539,7324	3803,4688
71	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-20	30,26	CLASSE 1 A (20-35)	6,49375520	5,79523000	0,50611516	2776,0476	0,00002909	0,09548962	16889,1810	4914,9427	8,65062750	4,94764610	1,70309280	0,05037999	541,9841	3856,7246
72	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-MA	25,69	CLASSE 1 A (20-35)	6,51165440	5,79990080	0,50647983	2778,7045	0,00002914	0,09567208	16906,6260	4922,2346	8,65522310	4,95268770	1,70439480	0,05046015	542,3296	3864,8956
73	(Artigo 01) 550C-40CR-MK	32,95	CLASSE 1 A (20-35)	6,58125470	5,81806190	0,50789708	2789,0302	0,00002933	0,09638158	16974,4540	4950,5883	8,67308870	4,97228840	1,70945630	0,05077179	543,6728	3896,6665
74	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-VRC	22,20	CLASSE 1 A (20-35)	6,61938210	5,81138530	0,51495953	2830,2654	0,00002905	0,09463737	16976,2270	4876,7456	8,63891990	4,89728740	1,70394370	0,05124086	543,2619	3864,6907
75	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-20	21,25	CLASSE 1 A (20-35)	6,77332680	5,85165650	0,51813147	2853,2435	0,00002947	0,09621708	17127,0550	4939,6798	8,67961930	4,94164690	1,71531280	0,05193187	546,2501	3935,1786
76	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-MA	17,16	CLASSE 1 A (20-35)	6,87739820	5,87881260	0,52025087	2868,6849	0,00002976	0,09727797	17228,4780	4982,0764	8,70633440	4,97095640	1,72288150	0,05239788	548,2587	3982,6852
77	(Artigo 01) 550C-50CR-MK	22,56	CLASSE 1 A (20-35)	6,94766290	5,89714730	0,52168181	2879,1103	0,00002995	0,09799424	17296,9540	5010,7008	8,72437140	4,99074500	1,72799160	0,05271251	549,6148	4014,7597

Fonte: Adaptado do SimaPro 8.2

Quadro B1 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1A

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Extração Mineral (MJ Surplus)	Cancerígenos (mPt)	Não Cancerígenos (mPt)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (mPt)	Radiação Ionizante (mPt)	Depleção da Camada de Ozônio (mPt)	Respiratórios Orgânicos (mPt)	Ecotoxicidade Aquática (mPt)	Exotoxicidade Terrestre (mPt)	Acidificação / Nutrição terrestre (mPt)	Ocupação do Solo (mPt)	Acidificação Aquática (mPt)	Eutrofização Aquática (mPt)	Aquecimento Global (mPt)
53	(Artigo 01) 550C-40CR-FA	20,58	CLASSE 1 A (20-35)	5,39842810	1,84569850	2,05632510	38,67842200	0,06366078	0,00329671	0,02158922	0,05149298	2,40250120	0,52138794	0,30714238	0	0	48,77432000
54	(Artigo 01) 500C-20CR	30,69	CLASSE 1 A (20-35)	5,45242600	1,75462110	2,25077560	39,16742600	0,06517420	0,00341661	0,02195766	0,05473809	2,62595830	0,54269543	0,32232380	0	0	53,42842400
55	(Artigo 01) 500C-25CR	28,83	CLASSE 1 A (20-35)	5,45619260	1,79904120	2,25886120	39,72907400	0,06623701	0,00343180	0,02195950	0,05507186	2,62476100	0,54314308	0,32122219	0	0	53,58642900
56	(Artigo 01) 500C-30CR	24,73	CLASSE 1 A (20-35)	5,45991590	1,84345700	2,26693920	40,29055100	0,06729956	0,00344696	0,02196118	0,05540529	2,62352400	0,54358824	0,32011471	0	0	53,74433000
57	(Artigo 01) 500C-40CR-VRC	16,55	CLASSE 1 A (20-35)	5,23314620	1,87158190	2,26726750	41,10472600	0,06874954	0,00341460	0,02149405	0,05552359	2,58495350	0,54148641	0,31446523	0	0	53,76055400
58	(Artigo 09) 17	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	5,52913120	1,66015700	2,38918870	39,05532200	0,06461106	0,00348785	0,02261765	0,05646482	2,68482810	0,57032876	0,32129887	0	0	57,14505400
59	(Artigo 09) 12	33,10	CLASSE 1 A (20-35)	5,58453470	1,67446150	2,39290730	39,12592300	0,06476571	0,00350264	0,02272892	0,05659350	2,69334540	0,57102579	0,32210359	0	0	57,21499200
60	(Artigo 01) 500C-40CR	17,66	CLASSE 1 A (20-35)	5,57450090	1,96003750	2,29034890	41,55507400	0,06973388	0,00350600	0,02217999	0,05632376	2,63765790	0,54585288	0,31948605	0	0	54,19730700
61	(Artigo 09) 11	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	5,55292230	1,65397420	2,39725820	39,28576700	0,06492774	0,00350987	0,02278178	0,05685320	2,73349200	0,57375039	0,33056490	0	0	57,24619500
62	(Artigo 09) 16	29,30	CLASSE 1 A (20-35)	5,55306660	1,65406470	2,39729590	39,28848500	0,06493335	0,00350996	0,02278213	0,05685475	2,73355160	0,57376407	0,33057735	0	0	57,24734300
63	(Artigo 01) 500C-50CR-VRC	12,10	CLASSE 1 A (20-35)	5,25895530	1,96538910	2,28472660	42,25545200	0,07093403	0,00344998	0,02153458	0,05623620	2,58542850	0,54262114	0,31253352	0	0	54,10089100
64	(Artigo 01) 550C-20CR	32,81	CLASSE 1 A (20-35)	5,56941010	1,83714000	2,43318750	41,11304900	0,06876729	0,00354532	0,02259290	0,05815152	2,76093640	0,56533233	0,32166496	0	0	57,75594600
65	(Artigo 01) 550C-30CR	27,05	CLASSE 1 A (20-35)	5,57648980	1,92101360	2,44844950	42,17345800	0,07077396	0,00357398	0,02259626	0,05878151	2,75864580	0,56617573	0,31958041	0	0	58,05422200
66	(Artigo 01) 550C-40CR-VRC	19,42	CLASSE 1 A (20-35)	5,45530930	1,97165120	2,45503900	43,06466000	0,07241079	0,00356831	0,02234188	0,05911084	2,73655220	0,56537851	0,31560937	0	0	58,18839600
67	(Artigo 01) 550C-40CR	21,10	CLASSE 1 A (20-35)	5,66335390	2,02556210	2,46910640	43,33913300	0,07301071	0,00362401	0,02275994	0,05959852	2,76867380	0,56803973	0,31866940	0	0	58,45458200
68	(Artigo 01) 550C-50CR-VRC	15,25	CLASSE 1 A (20-35)	5,48075160	2,06050070	2,47160430	44,15284200	0,07447686	0,00360201	0,02238242	0,05978658	2,73721060	0,56646630	0,31380809	0	0	58,51120600
69	(Artigo 01) 550C-30CR-MK-MA	30,24	CLASSE 1 A (20-35)	7,65631920	2,48110020	2,27291820	48,90879000	0,08022170	0,00427831	0,02867504	0,06127132	2,84028010	0,65592396	0,39573613	0	0	54,44649300
70	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-VRC	30,89	CLASSE 1 A (20-35)	7,48556050	2,51767480	2,27593810	49,71906600	0,08168622	0,00425896	0,02832122	0,06147544	2,81059170	0,65448198	0,39106981	0	0	54,51296800
71	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-20	30,26	CLASSE 1 A (20-35)	7,66330730	2,56373460	2,28795680	49,95356600	0,08219877	0,00430655	0,02867840	0,06189209	2,83803540	0,65675564	0,39368420	0	0	54,74038900
72	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-MA	25,69	CLASSE 1 A (20-35)	7,69057630	2,57080120	2,28980090	49,98956000	0,08227744	0,00431386	0,02873320	0,06195602	2,84224590	0,65710454	0,39408536	0	0	54,77528600
73	(Artigo 01) 550C-40CR-MK	32,95	CLASSE 1 A (20-35)	7,79661750	2,59827940	2,29697090	50,12944200	0,08258319	0,00434225	0,02894628	0,06220459	2,85861820	0,65846089	0,39564499	0	0	54,91095500
74	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-VRC	22,20	CLASSE 1 A (20-35)	7,74223200	2,61333210	2,29433490	50,82650500	0,08380416	0,00430027	0,02842244	0,06221108	2,81597920	0,65586680	0,38967716	0	0	54,86945600
75	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-20	21,25	CLASSE 1 A (20-35)	7,77234760	2,67410940	2,31023400	51,13957600	0,08448454	0,00436346	0,02889688	0,06276380	2,85231930	0,65895669	0,39320685	0	0	55,17125500
76	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-MA	17,16	CLASSE 1 A (20-35)	7,93590590	2,71519680	2,32095520	51,34876100	0,08494176	0,00440592	0,02921549	0,06313548	2,87680040	0,66098491	0,39553900	0	0	55,37412500
77	(Artigo 01) 550C-50CR-MK	22,56	CLASSE 1 A (20-35)	8,04295790	2,74293730	2,32819380	51,48999400	0,08525046	0,00443458	0,02943061	0,06338642	2,89332900	0,66235427	0,39711358	0	0	55,51109500

Quadro B1 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1A

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA			CATEGORIA DE DANOS (ENDPOINT CATEGORY)										Intensidade de Impacto Total (mPt/MPa)
				Energia Não Renovável (mPt)	Extração Mineral (mPt)	Saúde Humana (DALY)	Qualidade do Ecossistema (PDF*m2*yr)	Mudanças Climáticas (Kg CO2 Eq)	Recursos (MJ Primary)	Pontuação Única (mPt)	Saúde Humana (mPt)	Qualidade do Ecossistema (mPt)	Mudanças Climáticas (mPt)	Recursos (mPt)		
53	(Artigo 01) 550C-40CR-FA	20,58	CLASSE 1 A (20-35)	19,39019700	0,03552166	0,00030262	44,96608900	482,9141	2952,2369	114,1516	42,6690	3,2825	48,7743	19,4257	5,55	
54	(Artigo 01) 500C-20CR	30,69	CLASSE 1 A (20-35)	20,00349600	0,03587696	0,00030683	48,57144600	528,9943	3045,4973	120,2769	43,2634	3,5457	53,4284	20,0394	3,92	
55	(Artigo 01) 500C-25CR	28,83	CLASSE 1 A (20-35)	20,16756500	0,03590175	0,00031120	48,55065900	530,5587	3070,4357	121,2127	43,8786	3,5442	53,5864	20,2035	4,20	
56	(Artigo 01) 500C-30CR	24,73	CLASSE 1 A (20-35)	20,33152900	0,03592625	0,00031556	48,52920800	532,1221	3095,3579	122,1481	44,4937	3,5426	53,7443	20,3675	4,94	
57	(Artigo 01) 500C-40CR-VRC	16,55	CLASSE 1 A (20-35)	20,19774300	0,03443410	0,00032154	47,89628400	532,2827	3074,7990	122,8264	45,3372	3,4964	53,7606	20,2322	7,42	
58	(Artigo 09) 17	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	20,25238700	0,03638168	0,00030635	49,76603500	565,7926	3083,3995	124,2621	43,1954	3,6329	57,1451	20,2888	4,06	
59	(Artigo 09) 12	33,10	CLASSE 1 A (20-35)	20,36085200	0,03674624	0,00030698	49,90504600	566,4851	3099,9390	124,5400	43,2843	3,6431	57,2150	20,3976	3,76	
60	(Artigo 01) 500C-40CR	17,66	CLASSE 1 A (20-35)	20,87071500	0,03668022	0,00032554	48,75781700	536,6070	3177,4157	124,5649	45,9009	3,5593	54,1973	20,9074	7,05	
61	(Artigo 09) 11	30,60	CLASSE 1 A (20-35)	20,31543600	0,03653823	0,00030800	50,61178700	566,7940	3093,0052	124,7211	43,4282	3,6947	57,2462	20,3520	4,08	
62	(Artigo 09) 16	29,30	CLASSE 1 A (20-35)	20,31649300	0,03653918	0,00030802	50,61298300	566,8054	3093,1660	124,7262	43,4311	3,6947	57,2473	20,3530	4,26	
63	(Artigo 01) 500C-50CR-VRC	12,10	CLASSE 1 A (20-35)	20,56282600	0,03460393	0,00033051	47,90163400	535,6524	3130,3085	124,7966	46,6015	3,4968	54,1009	20,5974	10,31	
64	(Artigo 01) 550C-20CR	32,81	CLASSE 1 A (20-35)	20,92125100	0,03664672	0,00032254	50,76829000	571,8411	3185,0909	127,8982	45,4783	3,7061	57,7559	20,9579	3,90	
65	(Artigo 01) 550C-30CR	27,05	CLASSE 1 A (20-35)	21,23097700	0,03669330	0,00033078	50,72854000	574,7943	3232,1688	129,6649	46,6399	3,7032	58,0542	21,2677	4,79	
66	(Artigo 01) 550C-40CR-VRC	19,42	CLASSE 1 A (20-35)	21,28784400	0,03589594	0,00033752	50,36508100	576,1227	3240,6899	130,7785	47,5897	3,6767	58,1884	21,3237	6,73	
67	(Artigo 01) 550C-40CR	21,10	CLASSE 1 A (20-35)	21,69799800	0,03726487	0,00033995	50,89015700	578,7582	3303,2315	131,8380	47,9332	3,7150	58,4546	21,7353	6,25	
68	(Artigo 01) 550C-50CR-VRC	15,25	CLASSE 1 A (20-35)	21,63472500	0,03606335	0,00034600	50,37358300	579,3189	3293,4328	132,6447	48,7854	3,6773	58,5112	21,6708	8,70	
69	(Artigo 01) 550C-30CR-MK-MA	30,24	CLASSE 1 A (20-35)	25,07207100	0,05037858	0,00038139	54,15358200	539,0742	3818,0014	137,2981	53,7760	3,9532	54,4465	25,1224	4,54	
70	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-VRC	30,89	CLASSE 1 A (20-35)	25,02682400	0,04925499	0,00038743	53,66601200	539,7324	3810,9543	138,1336	54,6269	3,9176	54,5130	25,0761	4,47	
71	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-20	30,26	CLASSE 1 A (20-35)	25,37724800	0,05042456	0,00038951	54,11462100	541,9841	3864,3879	139,0389	54,9204	3,9504	54,7404	25,4277	4,59	
72	(Artigo 01) 550C-40CR-MK-MA	25,69	CLASSE 1 A (20-35)	25,43101300	0,05060399	0,00038983	54,18345000	542,3296	3872,5862	139,1778	54,9655	3,9554	54,7753	25,4816	5,42	
73	(Artigo 01) 550C-40CR-MK	32,95	CLASSE 1 A (20-35)	25,64006500	0,05130174	0,00039107	54,45107700	543,6728	3904,4631	139,7178	55,1406	3,9749	54,9110	25,6914	4,24	
74	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-VRC	22,20	CLASSE 1 A (20-35)	25,42966500	0,04962789	0,00039610	53,74978400	543,2619	3872,2330	140,1232	55,8507	3,9237	54,8695	25,4793	6,31	
75	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-20	21,25	CLASSE 1 A (20-35)	25,89347500	0,05117495	0,00039888	54,34584500	546,2501	3942,9559	141,3248	56,2417	3,9672	55,1713	25,9447	6,65	
76	(Artigo 01) 550C-50CR-MK-MA	17,16	CLASSE 1 A (20-35)	26,20606900	0,05221826	0,00040073	54,74602400	548,2587	3990,6211	142,1324	56,5035	3,9965	55,3741	26,2583	8,28	
77	(Artigo 01) 550C-50CR-MK	22,56	CLASSE 1 A (20-35)	26,41711900	0,05292266	0,00040199	55,01620900	549,6148	4022,8027	142,6776	56,6802	4,0162	55,5111	26,4700	6,32	

Fonte: Adaptado do SimaPro 8.2

B2. RESULTADOS COMPLETOS DA ACV DA CLASSE DE RESISTÊNCIA 1B UTILIZANDO O SOTWARE SIMAPRO 8.2, MÉTODO DE ANÁLISE DE IMPACTO "IMPACT 2002+" E O BANCO DE DADOS ECOINVENT 3.2

Quadro B2 - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1B

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Não Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Radiação Ionizante (Bq C-14 Eq)	Depleção da Camada de Ozônio (Kg CFC-11 Eq)	Respiratórios Orgânicos (Kg C2H4 Eq)	Ecotoxicidade Aquática (Kg TEG Water)	Exotoxicidade Terrestre (Kg TEG Soil)	Acidificação / Nutrificação terrestre (Kg SO2 Eq)	Ocupação do Solo (m2org.arable)	Acidificação Aquática (Kg SO2 Eq)	Eutrofização Aquática (Kg PO4-lim)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não Renovável (MJ Primary)
1	(Artigo 02) F 50 C 15	42,00	CLASSE 1 B (35-50)	2,36673750	1,56519150	0,23267488	858,0785	0,00001629	0,08069442	7975,2063	2752,0198	5,93184960	4,54348260	0,98602757	0,02393530	117,0064	1711,9819
2	(Artigo 14) P-100	46,00	CLASSE 1 B (35-50)	2,84415810	3,58724150	0,25597672	1364,7129	0,00001406	0,04561978	10527,9620	3791,6210	3,76901550	2,42640790	0,76372023	0,02595226	313,3528	1878,6756
3	(Artigo 07) CFL 50-50-0	41,60	CLASSE 1 B (35-50)	2,99901890	3,08079900	0,27732365	1371,4469	0,00001885	0,06907561	9554,1857	3120,7995	6,15274600	4,28003240	1,08284470	0,02505542	293,3801	2242,5245
4	(Artigo 07) CFL 55-20-25	36,30	CLASSE 1 B (35-50)	2,88789000	3,28552810	0,28000368	1417,2773	0,00001876	0,06613269	10076,4580	3409,0848	5,96624550	4,33045110	1,06371030	0,02594168	309,0898	2250,0501
5	(Artigo 07) CFL 55-30-15	37,50	CLASSE 1 B (35-50)	2,93724640	3,28618830	0,28241330	1421,3470	0,00001890	0,06734301	10029,3550	3336,2053	6,08951340	4,31629660	1,08204180	0,02595837	310,5496	2262,4407
6	(Artigo 14) P-50	47,00	CLASSE 1 B (35-50)	2,94360760	3,68225090	0,28237648	1497,3885	0,00001668	0,05550243	11233,0620	3902,3717	4,90265120	3,42305730	0,93353178	0,02785730	330,6356	2119,8164
7	(Artigo 14) E - P0	49,00	CLASSE 1 B (35-50)	3,04305710	3,77726040	0,30877625	1630,0641	0,00001931	0,06538508	11938,1630	4013,1224	6,03628690	4,41970670	1,10334330	0,02976233	347,9185	2360,9572
8	(Artigo 12) M6-350-50%	35,60	CLASSE 1 B (35-50)	3,24702700	4,20093100	0,32660369	1703,5460	0,00002084	0,07171991	11780,5400	3683,6472	6,82197370	4,26147600	1,23326870	0,03135004	398,2693	2553,4444
9	(Artigo 12) M5-350-40%	38,20	CLASSE 1 B (35-50)	3,25245370	4,21127990	0,32769300	1708,9721	0,00002093	0,07206916	11829,3080	3717,5337	6,84309210	4,31293700	1,23726240	0,03144144	398,8868	2562,7660
10	(Artigo 12) M4-350-30%	40,40	CLASSE 1 B (35-50)	3,28307190	4,22820260	0,32929555	1718,1374	0,00002108	0,07267519	11902,6280	3761,6828	6,87067820	4,37149360	1,24308870	0,03164566	399,9906	2583,5876
11	(Artigo 12) M3-350-20%	41,50	CLASSE 1 B (35-50)	3,28849860	4,23855150	0,33038487	1723,5635	0,00002117	0,07302444	11951,3960	3795,5693	6,89179660	4,42295460	1,24708240	0,03173707	400,6082	2592,9092
12	(Artigo 12) M2-350-10%	43,50	CLASSE 1 B (35-50)	3,31977970	4,25564710	0,33200093	1732,8273	0,00002133	0,07363723	12025,3630	3839,9884	6,91955300	4,48169790	1,25295680	0,03194426	401,7248	2614,0334
13	(Artigo 12) M1-350-0%	46,30	CLASSE 1 B (35-50)	3,37625230	4,27931650	0,33413023	1745,8303	0,00002156	0,07450681	12123,8810	3894,6701	6,95377720	4,54753670	1,26066380	0,03226426	403,3277	2646,6576
14	(Artigo 07) CFL 85-0-15	43,20	CLASSE 1 B (35-50)	3,60822110	4,64994410	0,34437783	1834,7756	0,00002202	0,07354002	12953,1450	4188,5382	6,91663120	4,53509980	1,27631540	0,03404684	435,2468	2755,2328
15	(Artigo 12) M12-400-50%	47,50	CLASSE 1 B (35-50)	3,71700330	4,73631150	0,35379386	1871,9671	0,00002246	0,07677829	12997,1590	4031,5250	7,22013180	4,34371230	1,32420500	0,03494674	446,5456	2812,3571
16	(Artigo 12) M11-400-40%	48,40	CLASSE 1 B (35-50)	3,72216390	4,74615260	0,35482970	1877,1269	0,00002254	0,07711039	13043,5340	4063,7492	7,24021320	4,39264600	1,32800260	0,03503366	447,1329	2821,2212
17	(Artigo 09) 3	35,70	CLASSE 1 B (35-50)	3,73732530	5,09208330	0,35209122	1913,1399	0,00002166	0,07068347	13388,5470	4078,1562	6,90734460	3,95481150	1,29506120	0,03563213	478,5498	2776,9309
18	(Artigo 09) 10	40,80	CLASSE 1 B (35-50)	3,91382140	5,08239040	0,34962659	1909,5419	0,00002171	0,07088074	13284,9330	3944,1681	6,84100080	3,72991800	1,28784040	0,03601439	478,9859	2819,4241
19	(Artigo 09) 9	45,90	CLASSE 1 B (35-50)	3,84815240	5,09308260	0,35132142	1914,7216	0,00002175	0,07101007	13358,5270	4020,1411	6,87989680	3,84846300	1,29308880	0,03592448	479,2032	2808,4658
20	(Artigo 09) 5	47,10	CLASSE 1 B (35-50)	4,01771990	5,10947430	0,35172521	1924,8406	0,00002200	0,07194075	13386,0360	3986,4867	6,86758000	3,75910940	1,29536360	0,03647860	480,9859	2866,8095
21	(Artigo 03) CONTROLE	36,19	CLASSE 1 B (35-50)	3,94537960	5,18159970	0,35813776	1956,5369	0,00002235	0,07319245	13740,0730	4303,7516	6,95027660	4,15156060	1,31168960	0,03675333	483,5058	2883,7498
22	(Artigo 01) 500C-5CR	44,54	CLASSE 1 B (35-50)	4,07167140	5,63046860	0,37902483	2088,0740	0,00002267	0,07274092	14629,4890	4539,7345	7,12162560	4,08259460	1,35769990	0,03890680	523,6252	2949,3386
23	(Artigo 01) 500C-10CR	42,09	CLASSE 1 B (35-50)	4,18418500	5,65094920	0,38471536	2123,9684	0,00002278	0,07274707	14720,5680	4537,6614	7,12752250	4,06875060	1,36152330	0,03957192	525,1897	2974,2736
24	(Artigo 01) 500C-15CR	37,35	CLASSE 1 B (35-50)	4,29735770	5,67159730	0,39044240	2160,0883	0,00002288	0,07275482	14812,4100	4535,7652	7,13354180	4,05503140	1,36538470	0,04024116	526,7656	2999,3917
25	(Artigo 09) 19	48,40	CLASSE 1 B (35-50)	4,23581760	6,01042510	0,39095730	2160,2199	0,00002326	0,07420949	15194,6740	4480,3678	7,42146620	3,80409940	1,41833510	0,04049296	563,7587	3058,2553
26	(Artigo 09) 18	35,70	CLASSE 1 B (35-50)	4,23905190	6,03595190	0,39371312	2173,9398	0,00002346	0,07495089	15319,8690	4572,7985	7,47175010	3,92656040	1,42746240	0,04068853	565,1382	3076,6015
27	(Artigo 09) 20	45,90	CLASSE 1 B (35-50)	4,39709450	6,02794870	0,39156638	2170,9839	0,00002351	0,07514850	15230,4150	4455,4029	7,41366260	3,72857110	1,42121840	0,04103500	565,5612	3115,0916
28	(Artigo 09) 13	38,20	CLASSE 1 B (35-50)	4,29318330	6,05004170	0,39479311	2181,8195	0,00002361	0,07550383	15372,4270	4594,8408	7,48552680	3,94171540	1,43135650	0,04092958	566,1761	3101,2566
29	(Artigo 01) 550C-20CR-MK	47,33	CLASSE 1 B (35-50)	6,07514160	5,71904660	0,48494442	2642,5068	0,00002871	0,09546725	16550,3880	4922,7175	8,62871800	4,99922150	1,68887290	0,04790549	536,1643	3763,9656
30	(Artigo 01) 550C-30CR-MK-20	35,63	CLASSE 1 B (35-50)	6,23208130	5,74347370	0,49446334	2701,5073	0,00002875	0,09494461	16668,7500	4897,4968	8,62623010	4,95868570	1,69217440	0,04890825	538,0635	3786,4405
31	(Artigo 01) 550C-30CR-MK	39,83	CLASSE 1 B (35-50)	6,28444840	5,75713830	0,49552979	2709,2772	0,00002890	0,09547844	16719,7850	4918,8301	8,63967280	4,97343380	1,69598280	0,04914274	539,0742	3810,3451

Fonte: Adaptado do SimaPro 8.2

Quadro B2 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1B

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Extração Mineral (MJ Surplus)	Cancerígenos (mPt)	Não Cancerígenos (mPt)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (mPt)	Radiação Ionizante (mPt)	Depleção da Camada de Ozônio (mPt)	Respiratórios Orgânicos (mPt)	Ecotoxicidade Aquática (mPt)	Exotoxicidade Terrestre (mPt)	Acidificação / Nutrição terrestre (mPt)	Ocupação do Solo (mPt)	Acidificação Aquática (mPt)	Eutrofização Aquática (mPt)	Aquecimento Global (mPt)
1	(Artigo 02) F 50 C 15	42,00	CLASSE 1 B (35-50)	14,68878700	0,93438797	0,61793760	22,96501100	0,02540770	0,00241152	0,02423496	0,02922594	1,58909880	0,45034602	0,36152491	0	0	11,81764100
2	(Artigo 14) P-100	46,00	CLASSE 1 B (35-50)	3,73787710	1,12287360	1,41624290	25,26490300	0,04040915	0,00208110	0,01370099	0,03858077	2,18939570	0,28614366	0,19306928	0	0	31,64863100
3	(Artigo 07) CFL 50-50-0	41,60	CLASSE 1 B (35-50)	5,24949400	1,18401270	1,21629940	27,37184400	0,04060854	0,00279009	0,02074548	0,03501227	1,80204330	0,46711648	0,34056218	0	0	29,63138500
4	(Artigo 07) CFL 55-20-25	36,30	CLASSE 1 B (35-50)	4,97017760	1,14013900	1,29712650	27,63636300	0,04196558	0,00277767	0,01986163	0,03692619	1,96850780	0,45295736	0,34457400	0	0	31,21807200
5	(Artigo 07) CFL 55-30-15	37,50	CLASSE 1 B (35-50)	5,05513010	1,15962490	1,29738710	27,87419200	0,04208608	0,00279833	0,02022513	0,03675358	1,92642500	0,46231586	0,34344772	0	0	31,36550600
6	(Artigo 14) P-50	47,00	CLASSE 1 B (35-50)	4,50672090	1,16213630	1,45375270	27,87055900	0,04433767	0,00247016	0,01666904	0,04116468	2,25334650	0,37220928	0,27237267	0	0	33,39420000
7	(Artigo 14) E - P0	49,00	CLASSE 1 B (35-50)	5,27556470	1,20139900	1,49126240	30,47621500	0,04826620	0,00285921	0,01963710	0,04374859	2,31729730	0,45827490	0,35167606	0	0	35,13976900
8	(Artigo 12) M6-350-50%	35,60	CLASSE 1 B (35-50)	5,36748200	1,28192620	1,65852760	32,23578400	0,05044200	0,00308504	0,02153964	0,04317097	2,12704840	0,51792424	0,33908565	0	0	40,22519400
9	(Artigo 12) M5-350-40%	38,20	CLASSE 1 B (35-50)	5,40088830	1,28406870	1,66261330	32,34329900	0,05060266	0,00309815	0,02164453	0,04334968	2,14661550	0,51952755	0,34318040	0	0	40,28756700
10	(Artigo 12) M4-350-30%	40,40	CLASSE 1 B (35-50)	5,47267320	1,29615680	1,66929440	32,50147100	0,05087405	0,00312153	0,02182654	0,04361837	2,17210850	0,52162189	0,34783974	0	0	40,39905300
11	(Artigo 12) M3-350-20%	41,50	CLASSE 1 B (35-50)	5,50607960	1,29829920	1,67338010	32,60898600	0,05103472	0,00313464	0,02193143	0,04379709	2,19167560	0,52322520	0,35193450	0	0	40,46142600
12	(Artigo 12) M2-350-10%	43,50	CLASSE 1 B (35-50)	5,57887440	1,31064900	1,68012950	32,76849200	0,05130902	0,00315830	0,02211547	0,04406814	2,21732450	0,52533246	0,35660870	0	0	40,57420500
13	(Artigo 12) M1-350-0%	46,30	CLASSE 1 B (35-50)	5,69004790	1,33294440	1,68947420	32,97865400	0,05169403	0,00319223	0,02237663	0,04442918	2,24889940	0,52793076	0,36184749	0	0	40,73609700
14	(Artigo 07) CFL 85-0-15	43,20	CLASSE 1 B (35-50)	5,55647700	1,42452570	1,83579790	33,99009200	0,05432770	0,00325946	0,02208627	0,04746810	2,41858760	0,52511064	0,36085789	0	0	43,95992500
15	(Artigo 12) M12-400-50%	47,50	CLASSE 1 B (35-50)	5,89066360	1,46747290	1,86989580	34,91945400	0,05542895	0,00332521	0,02305882	0,04762939	2,32792350	0,54815241	0,34562919	0	0	45,10110900
16	(Artigo 12) M11-400-40%	48,40	CLASSE 1 B (35-50)	5,92242890	1,46951030	1,87378100	35,02169100	0,05558173	0,00333767	0,02315856	0,04779933	2,34653070	0,54967699	0,34952284	0	0	45,16042000
17	(Artigo 09) 3	35,70	CLASSE 1 B (35-50)	5,26143640	1,47549600	2,01035450	34,75140300	0,05664807	0,00320668	0,02122837	0,04906367	2,35484980	0,52440560	0,31468435	0	0	48,33352600
18	(Artigo 09) 10	40,80	CLASSE 1 B (35-50)	5,42241680	1,54517670	2,00652770	34,50814500	0,05654154	0,00321417	0,02128761	0,04868396	2,27748100	0,51936878	0,29678957	0	0	48,37757100
19	(Artigo 09) 9	45,90	CLASSE 1 B (35-50)	5,37612700	1,51925060	2,01074900	34,67542400	0,05669491	0,00321956	0,02132645	0,04895366	2,32135010	0,52232177	0,30622220	0	0	48,39952200
20	(Artigo 09) 5	47,10	CLASSE 1 B (35-50)	5,58086610	1,58619580	2,01722050	34,71527900	0,05699453	0,00325656	0,02160596	0,04905447	2,30191700	0,52138667	0,29911233	0	0	48,57957500
21	(Artigo 03) CONTROLE	36,19	CLASSE 1 B (35-50)	5,61897860	1,55763580	2,04569560	35,34819700	0,05793306	0,00330848	0,02198189	0,05035187	2,48511530	0,52766500	0,33033968	0	0	48,83408800
22	(Artigo 01) 500C-5CR	44,54	CLASSE 1 B (35-50)	5,38851280	1,60749590	2,22290900	37,40975100	0,06182787	0,00335685	0,02184628	0,05361122	2,62137890	0,54067382	0,32485205	0	0	52,88614900
23	(Artigo 01) 500C-10CR	42,09	CLASSE 1 B (35-50)	5,39227980	1,65191620	2,23099470	37,97140600	0,06289070	0,00337204	0,02184813	0,05394500	2,62018180	0,54112151	0,32375048	0	0	53,04415600
24	(Artigo 01) 500C-15CR	37,35	CLASSE 1 B (35-50)	5,39618660	1,69659680	2,23914660	38,53666500	0,06396022	0,00338738	0,02185045	0,05428156	2,61908690	0,54157850	0,32265885	0	0	53,20333000
25	(Artigo 09) 19	48,40	CLASSE 1 B (35-50)	5,48086880	1,67230080	2,37291580	38,58748600	0,06396411	0,00344345	0,02228734	0,05568240	2,58709880	0,56343772	0,30269219	0	0	56,93962400
26	(Artigo 09) 18	35,70	CLASSE 1 B (35-50)	5,53347470	1,67357770	2,38299380	38,85948500	0,06437036	0,00347331	0,02251000	0,05614119	2,64047100	0,56725527	0,31243641	0	0	57,07895500
27	(Artigo 09) 20	45,90	CLASSE 1 B (35-50)	5,67912500	1,73597290	2,37983410	38,64760200	0,06428283	0,00348083	0,02256935	0,05581338	2,57268330	0,56284526	0,29668240	0	0	57,12167700
28	(Artigo 09) 13	38,20	CLASSE 1 B (35-50)	5,61614720	1,69494880	2,38855650	38,96608000	0,06460368	0,00349540	0,02267607	0,05633380	2,65319890	0,56830120	0,31364229	0	0	57,18378900
29	(Artigo 01) 550C-20CR-MK	47,33	CLASSE 1 B (35-50)	7,64933100	2,39846590	2,25787960	47,86401400	0,07824463	0,00425006	0,02867168	0,06065055	2,84252480	0,65509227	0,39778806	0	0	54,15259800
30	(Artigo 01) 550C-30CR-MK-20	35,63	CLASSE 1 B (35-50)	7,57653510	2,46042570	2,26752340	48,80353100	0,07999163	0,00425695	0,02851472	0,06108430	2,82796160	0,65490339	0,39456262	0	0	54,34441200
31	(Artigo 01) 550C-30CR-MK	39,83	CLASSE 1 B (35-50)	7,65631920	2,48110020	2,27291820	48,90879000	0,08022170	0,00427831	0,02867504	0,06127132	2,84028010	0,65592396	0,39573613	0	0	54,44649300

Fonte: Adaptado do SimaPro 8.2

Quadro B2 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 1B

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA			CATEGORIA DE DANOS (ENDPOINT CATEGORY)									Intensidade de Impacto Total (mPt/MPa)
				Energia Não Renovável (mPt)	Extração Mineral (mPt)	Saúde Humana (DALY)	Qualidade do Ecossistema (PDF*m2*yr)	Mudanças Climáticas (Kg CO2 Eq)	Recursos (MJ Primary)	Pontuação Única (mPt)	Saúde Humana (mPt)	Qualidade do Ecossistema (mPt)	Mudanças Climáticas (mPt)	Recursos (mPt)	
1	(Artigo 02) F 50 C 15	42,00	CLASSE 1 B (35-50)	11,26484100	0,09665222	0,00017425	33,29035200	117,0064	1726,6706	50,1787	24,5694	2,4302	11,8176	11,3615	1,19
2	(Artigo 14) P-100	46,00	CLASSE 1 B (35-50)	12,36168500	0,02459523	0,00019759	37,08478700	313,3528	1882,4135	74,6023	27,8602	2,7072	31,6486	12,3863	1,62
3	(Artigo 07) CFL 50-50-0	41,60	CLASSE 1 B (35-50)	14,75581100	0,03454167	0,00021160	36,22923500	293,3801	2247,7740	76,9028	29,8363	2,6447	29,6314	14,7904	1,85
4	(Artigo 07) CFL 55-20-25	36,30	CLASSE 1 B (35-50)	14,80533000	0,03270377	0,00021375	38,39678600	309,0898	2255,0203	78,9973	30,1382	2,8030	31,2181	14,8380	2,18
5	(Artigo 07) CFL 55-30-15	37,50	CLASSE 1 B (35-50)	14,88686000	0,03326276	0,00021558	37,93071500	310,5496	2267,4959	79,4509	30,3963	2,7689	31,3655	14,9201	2,12
6	(Artigo 14) P-50	47,00	CLASSE 1 B (35-50)	13,94839200	0,02965422	0,00021667	40,26155000	330,6356	2124,3231	80,8613	30,5499	2,9391	33,3942	13,9780	1,72
7	(Artigo 14) E - P0	49,00	CLASSE 1 B (35-50)	15,53509800	0,03471322	0,00023574	43,43831300	347,9185	2366,2327	87,1202	33,2396	3,1710	35,1398	15,5698	1,78
8	(Artigo 12) M6-350-50%	35,60	CLASSE 1 B (35-50)	16,80166400	0,03531803	0,00025001	41,46889400	398,2693	2558,8119	95,3407	35,2513	3,0272	40,2252	16,8370	2,68
9	(Artigo 12) M5-350-40%	38,20	CLASSE 1 B (35-50)	16,86300000	0,03553785	0,00025082	41,81744000	398,8868	2568,1669	95,6041	35,3653	3,0527	40,2876	16,8985	2,50
10	(Artigo 12) M4-350-30%	40,40	CLASSE 1 B (35-50)	17,00000600	0,03601019	0,00025208	42,26285600	399,9906	2589,0603	96,0630	35,5427	3,0852	40,3991	17,0360	2,38
11	(Artigo 12) M3-350-20%	41,50	CLASSE 1 B (35-50)	17,06134300	0,03623000	0,00025288	42,61140200	400,6082	2598,4153	96,3264	35,6568	3,1106	40,4614	17,0976	2,32
12	(Artigo 12) M2-350-10%	43,50	CLASSE 1 B (35-50)	17,20034000	0,03670899	0,00025415	43,05936700	401,7248	2619,6123	96,7904	35,8359	3,1433	40,5742	17,2370	2,23
13	(Artigo 12) M1-350-0%	46,30	CLASSE 1 B (35-50)	17,41500700	0,03744052	0,00025587	43,60420300	403,3277	2652,3477	97,4500	36,0783	3,1831	40,7361	17,4524	2,10
14	(Artigo 07) CFL 85-0-15	43,20	CLASSE 1 B (35-50)	18,12943200	0,03656162	0,00026475	45,91814000	435,2468	2760,7892	102,8080	37,3301	3,3520	43,9599	18,1660	2,38
15	(Artigo 12) M12-400-50%	47,50	CLASSE 1 B (35-50)	18,50531000	0,03876057	0,00027191	44,78540400	446,5456	2818,2478	105,2532	38,3386	3,2693	45,1011	18,5441	2,22
16	(Artigo 12) M11-400-40%	48,40	CLASSE 1 B (35-50)	18,56363500	0,03896958	0,00027267	45,11684700	447,1329	2827,1436	105,5036	38,4471	3,2935	45,1604	18,6026	2,18
17	(Artigo 09) 3	35,70	CLASSE 1 B (35-50)	18,27220500	0,03462025	0,00027176	44,42470400	478,5498	2782,1923	108,2017	38,3183	3,2430	48,3335	18,3068	3,03
18	(Artigo 09) 10	40,80	CLASSE 1 B (35-50)	18,55181100	0,03567950	0,00027050	43,04552500	478,9859	2824,8465	108,2483	38,1409	3,1423	48,3776	18,5875	2,65
19	(Artigo 09) 9	45,90	CLASSE 1 B (35-50)	18,47970500	0,03537492	0,00027154	43,81983200	479,2032	2813,8419	108,4001	38,2867	3,1988	48,3995	18,5151	2,36
20	(Artigo 09) 5	47,10	CLASSE 1 B (35-50)	18,86360700	0,03672210	0,00027234	43,44480100	480,9859	2872,3904	109,0519	38,4006	3,1715	48,5796	18,9003	2,32
21	(Artigo 03) CONTROLE	36,19	CLASSE 1 B (35-50)	18,97507300	0,03697288	0,00027684	46,48591600	483,5058	2889,3687	110,2744	39,0348	3,3935	48,8341	19,0120	3,05
22	(Artigo 01) 500C-5CR	44,54	CLASSE 1 B (35-50)	19,40664800	0,03545641	0,00029310	48,50021900	523,6252	2954,7271	117,1960	41,3272	3,5405	52,8861	19,4421	2,63
23	(Artigo 01) 500C-10CR	42,09	CLASSE 1 B (35-50)	19,57072000	0,03548120	0,00029746	48,47943600	525,1897	2979,6659	118,1318	41,9424	3,5390	53,0442	19,6062	2,81
24	(Artigo 01) 500C-15CR	37,35	CLASSE 1 B (35-50)	19,73599800	0,03550691	0,00030186	48,46035400	526,7656	3004,7879	119,0741	42,5616	3,5376	53,2033	19,7715	3,19
25	(Artigo 09) 19	48,40	CLASSE 1 B (35-50)	20,12332000	0,03606412	0,00030300	48,06727500	563,7587	3063,7362	123,3303	42,7224	3,5089	56,9396	20,1594	2,55
26	(Artigo 09) 18	35,70	CLASSE 1 B (35-50)	20,24403800	0,03641026	0,00030501	48,99046400	565,1382	3082,1350	123,9421	43,0064	3,5763	57,0790	20,2804	3,47
27	(Artigo 09) 20	45,90	CLASSE 1 B (35-50)	20,49730300	0,03736864	0,00030393	47,78115500	565,5612	3120,7707	123,9981	42,8537	3,4880	57,1217	20,5347	2,70
28	(Artigo 09) 13	38,20	CLASSE 1 B (35-50)	20,40626900	0,03695425	0,00030596	49,19830400	566,1761	3106,8728	124,3589	43,1404	3,5915	57,1838	20,4432	3,26
29	(Artigo 01) 550C-20CR-MK	47,33	CLASSE 1 B (35-50)	24,76689400	0,05033260	0,00037327	54,19254300	536,1643	3771,6150	135,5574	52,6315	3,9561	54,1526	24,8172	2,86
30	(Artigo 01) 550C-30CR-MK-20	35,63	CLASSE 1 B (35-50)	24,91477800	0,04985360	0,00038046	53,95221800	538,0635	3794,0170	136,8918	53,6442	3,9385	54,3444	24,9646	3,84
31	(Artigo 01) 550C-30CR-MK	39,83	CLASSE 1 B (35-50)	25,07207100	0,05037858	0,00038139	54,15358200	539,0742	3818,0014	137,2981	53,7760	3,9532	54,4465	25,1224	3,45

Fonte: Adaptado do SimaPro 8.2

B3. RESULTADOS COMPLETOS DA ACV DA CLASSE DE RESISTÊNCIA 2 UTILIZANDO O SOTWARE SIMAPRO 8.2, MÉTODO DE ANÁLISE DE IMPACTO "IMPACT 2002+" E O BANCO DE DADOS ECOINVENT 3.2

Quadro B3 - Resultados da ACV completa da classe de resistência 2

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Não Cancerígenos (Kg C2H3Cl Eq)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (Kg PM2.5 Eq)	Radiação Ionizante (Bq C-14 Eq)	Depleção da Camada de Ozônio (Kg CFC-11 Eq)	Respiratórios Orgânicos (Kg C2H4 Eq)	Ecotoxicidade Aquática (Kg TEG Water)	Exotoxicidade Terrestre (Kg TEG Soil)	Acidificação / Nutrição terrestre (Kg SO2 Eq)	Ocupação do Solo (m2org.arable)	Acidificação Aquática (Kg SO2 Eq)	Eutrofização Aquática (Kg PO4-lim)	Aquecimento Global (Kg CO2 Eq)	Energia Não Renovável (MJ Primary)
1	(Artigo 02) F 30 C 15	58,00	CLASSE 2 (50-80)	2,51738410	1,82817510	0,25102133	909,71509	0,00001704	0,08776922	9225,1186	3150,5426	6,25927760	4,77352070	1,05580810	0,02889640	124,4881	1796,4230
2	(Artigo 02) F 20 C 15	63,00	CLASSE 2 (50-80)	2,59685220	1,96683610	0,26059798	936,55927	0,00001744	0,09146411	9883,9321	3360,4601	6,42884990	4,89313300	1,09217320	0,03151254	128,3930	1840,2654
3	(Artigo 02) F 10 C 15	68,00	CLASSE 2 (50-80)	2,67533790	2,10728340	0,27019671	963,44906	0,00001782	0,09516672	10551,0800	3573,3442	6,59696650	5,01259570	1,12848110	0,03416928	132,2866	1883,7251
4	(Artigo 02) F 00 C 15	62,00	CLASSE 2 (50-80)	2,76282930	2,25765060	0,28081566	993,36807	0,00001827	0,09926062	11266,0690	3801,0841	6,78867730	5,14630230	1,16901700	0,03700015	136,6304	1932,9840
5	(Artigo 02) F 00 C 25	66,00	CLASSE 2 (50-80)	2,78760560	2,21164130	0,28721412	1018,15330	0,00001890	0,10161187	11069,4400	3737,0951	7,05159250	5,27085420	1,20184080	0,03589810	139,7938	1989,5035
6	(Artigo 08) SCC 100	51,00	CLASSE 2 (50-80)	2,68718230	3,45167100	0,24004842	1231,67970	0,00001392	0,04562452	9771,1906	3693,2140	3,67830900	2,52189520	0,73574127	0,02362187	302,9511	1833,8522
7	(Artigo 08) SCC 40	53,00	CLASSE 2 (50-80)	2,70249780	3,53132800	0,26698801	1365,28200	0,00001659	0,05565804	10458,0600	3769,2604	4,92350730	3,61300680	0,91895979	0,02531769	320,4205	2059,7057
8	(Artigo 08) SCC 20	54,00	CLASSE 2 (50-80)	2,75517950	3,57214290	0,27765397	1418,30470	0,00001763	0,05959228	10745,0360	3821,7007	5,35808940	3,99505560	0,98457900	0,02611234	327,2936	2158,3357
9	(Artigo 08) SCC 0	54,00	CLASSE 2 (50-80)	2,70182300	3,58531770	0,28616986	1455,61230	0,00001839	0,06244889	10928,9020	3831,0355	5,76576650	4,34750410	1,04252880	0,02643247	332,1240	2208,6150
10	(Artigo 06) FA 40	56,30	CLASSE 2 (50-80)	3,01660560	3,53610130	0,30985546	1536,87890	0,00002034	0,07304466	10611,3430	3305,5638	6,90199740	4,61601240	1,20958120	0,02752980	341,1896	2394,6027
11	(Artigo 06) GGBFS 40	67,50	CLASSE 2 (50-80)	3,18685190	3,97561670	0,33656326	1608,45330	0,00002122	0,08328621	12700,1550	3977,7174	7,31441820	4,93377370	1,30652600	0,03604566	351,1927	2492,2434
12	(Artigo 07) CFL 70-30-0	51,00	CLASSE 2 (50-80)	3,45747930	3,98368480	0,31835205	1645,88030	0,00002093	0,07328020	11492,5410	3686,6737	6,69799110	4,42361080	1,21147740	0,03045379	375,8609	2573,8387
13	(Artigo 06) FA 30	59,00	CLASSE 2 (50-80)	3,19758350	3,96887090	0,32861853	1664,00770	0,00002121	0,07448039	11511,9870	3562,2576	7,14067860	4,65872060	1,26705990	0,02997954	380,8441	2534,9158
14	(Artigo 06) GGBFS 30	62,00	CLASSE 2 (50-80)	3,32526820	4,29850740	0,34864938	1717,68850	0,00002186	0,08216156	13078,5970	4066,3728	7,44999420	4,89704150	1,33976850	0,03636643	388,3465	2608,1464
15	(Artigo 15) G45	61,70	CLASSE 2 (50-80)	3,85737580	4,51708950	0,33321491	1771,33480	0,00002149	0,07354945	12438,0800	3909,2257	6,70856530	4,07370720	1,24393230	0,03337020	422,8979	2733,2566
16	(Artigo 06) FA 20	67,00	CLASSE 2 (50-80)	3,37856140	4,40164050	0,34738159	1791,13650	0,00002207	0,07591613	12412,6320	3818,9515	7,37935980	4,70142870	1,32453860	0,03242928	420,4987	2675,2290
17	(Artigo 15) G30	64,60	CLASSE 2 (50-80)	3,88237900	4,53463990	0,33631461	1785,26770	0,00002174	0,07454911	12531,1320	3949,7187	6,78933750	4,17122240	1,25726760	0,03361711	424,6124	2760,5333
18	(Artigo 15) G15	66,40	CLASSE 2 (50-80)	3,90738220	4,55219030	0,33941431	1799,20050	0,00002199	0,07554876	12624,1840	3990,2116	6,87010960	4,26873760	1,27060290	0,03386402	426,3269	2787,8100
19	(Artigo 15) G0	67,40	CLASSE 2 (50-80)	3,93901480	4,57147070	0,34264907	1814,11740	0,00002227	0,07661599	12723,6970	4033,4052	6,95258390	4,36812000	1,28442050	0,03414062	428,1694	2818,1130
20	(Artigo 06) GGBFS 20	58,70	CLASSE 2 (50-80)	3,46368450	4,62139810	0,36073549	1826,92370	0,00002251	0,08103691	13457,0380	4155,0283	7,58557020	4,86030930	1,37301100	0,03668721	425,5003	2724,0493
21	(Artigo 04) RM 0	80,50	CLASSE 2 (50-80)	4,09007480	4,47011180	0,35601893	1812,06720	0,00002319	0,08341360	12733,0050	3898,6848	7,55024880	4,60754150	1,36557790	0,03373622	423,7130	2876,5089
22	(Artigo 04) RM 10	81,00	CLASSE 2 (50-80)	4,11791340	4,51003990	0,36524413	1845,90660	0,00002382	0,08688244	12934,9550	3973,1826	7,80432960	4,75489570	1,40471870	0,03446044	427,6068	2937,8228
23	(Artigo 12) M10-400-30%	51,60	CLASSE 2 (50-80)	3,78566260	4,77121710	0,35705410	1890,94600	0,00002279	0,07803716	13146,7670	4119,7393	7,27527280	4,45801150	1,33604390	0,03538184	448,8462	2856,7168
24	(Artigo 12) M9-400-20%	53,20	CLASSE 2 (50-80)	3,79082320	4,78105820	0,35808994	1896,10580	0,00002287	0,07836926	13193,1420	4151,9634	7,29535430	4,50694520	1,33984160	0,03546875	449,4335	2865,5809
25	(Artigo 12) M8-400-10%	59,40	CLASSE 2 (50-80)	3,79598380	4,79089930	0,35912577	1901,26550	0,00002296	0,07870136	13239,5170	4184,1875	7,31543570	4,55587890	1,34363920	0,03555567	450,0207	2874,4450
26	(Artigo 12) M13-450-0%	67,70	CLASSE 2 (50-80)	3,88364210	4,80931470	0,35880759	1904,85470	0,00002302	0,07915241	13274,4010	4206,7050	7,26641460	4,51400070	1,33979240	0,03585804	450,6218	2900,0440
27	(Artigo 04) RM 20	81,00	CLASSE 2 (50-80)	4,13249340	4,54650800	0,37419920	1877,77800	0,00002442	0,09021612	13123,9820	4042,2789	8,05500620	4,89851540	1,44289510	0,03512529	431,2446	2993,0840
28	(Artigo 12) M7-400-0%	62,20	CLASSE 2 (50-80)	3,83031340	4,80835210	0,36075589	1910,75500	0,00002312	0,07933080	13314,3210	4228,2946	7,34300620	4,61302840	1,34955860	0,03577322	451,1710	2896,6249
29	(Artigo 09) 4	55,30	CLASSE 2 (50-80)	3,90763430	5,10857600	0,35251511	1923,42740	0,00002191	0,07161731	13416,3400	4044,3652	6,89507220	3,86514390	1,29738100	0,03618977	480,3459	2835,5749
30	(Artigo 04) RM 30	82,00	CLASSE 2 (50-80)	4,16055130	4,58660890	0,38346518	1911,75190	0,00002505	0,09370028	13326,8240	4117,0600	8,31025840	5,04651410	1,48221590	0,03585213	435,1563	3054,6586
31	(Artigo 04) RM 40	83,00	CLASSE 2 (50-80)	4,21512650	4,63362950	0,39327143	1949,66180	0,00002576	0,09745474	13555,5100	4202,6438	8,57231870	5,20198181				

Quadro B3 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 2

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CATEGORIA DE IMPACTOS (MIDPOINT CATEGORY)													
				Extração Mineral (MJ Surplus)	Cancerígenos (mPt)	Não Cancerígenos (mPt)	Efeitos Respiratórios Inorgânicos (mPt)	Radiação Ionizante (mPt)	Depleção da Camada de Ozônio (mPt)	Respiratórios Orgânicos (mPt)	Ecotoxicidade Aquática (mPt)	Exotoxicidade Terrestre (mPt)	Acidificação / Nutrificação terrestre (mPt)	Ocupação do Solo (mPt)	Acidificação Aquática (mPt)	Eutrofização Aquática (mPt)	Aquecimento Global (mPt)
1	(Artigo 02) F 30 C 15	58,00	CLASSE 2 (50-80)	19,04364700	0,99386326	0,72176354	24,77580500	0,02693666	0,00252347	0,02635973	0,03380637	1,81921780	0,47520436	0,37982905	0	0	12,57329800
2	(Artigo 02) F 20 C 15	63,00	CLASSE 2 (50-80)	21,34420900	1,02523720	0,77650689	25,72102100	0,02773152	0,00258139	0,02746942	0,03622066	1,94043050	0,48807828	0,38934659	0	0	12,96769500
3	(Artigo 02) F 10 C 15	68,00	CLASSE 2 (50-80)	23,68290500	1,05622340	0,83195550	26,66841600	0,02852773	0,00263873	0,02858142	0,03866549	2,06335610	0,50084170	0,39885224	0	0	13,36094700
4	(Artigo 02) F 00 C 15	62,00	CLASSE 2 (50-80)	26,16473400	1,09076500	0,89132047	27,71650600	0,02941363	0,00270426	0,02981094	0,04128564	2,19486000	0,51539638	0,40949127	0	0	13,79966700
5	(Artigo 02) F 00 C 25	66,00	CLASSE 2 (50-80)	24,87149400	1,10054670	0,87315597	28,34803300	0,03014752	0,00279747	0,03051709	0,04056507	2,15791080	0,53535690	0,41940187	0	0	14,11917100
6	(Artigo 08) SCC 100	51,00	CLASSE 2 (50-80)	3,22521060	1,06089960	1,36271970	23,69277900	0,03647004	0,00206088	0,01370241	0,03580751	2,13257260	0,27925722	0,20066720	0	0	30,59806500
7	(Artigo 08) SCC 40	53,00	CLASSE 2 (50-80)	3,94544200	1,06694610	1,39416830	26,35171700	0,04042600	0,00245599	0,01671578	0,03832461	2,17648400	0,37379267	0,28748695	0	0	32,36247200
8	(Artigo 08) SCC 20	54,00	CLASSE 2 (50-80)	4,25761240	1,08774480	1,41028200	27,40444700	0,04199600	0,00261062	0,01789735	0,03937626	2,20676460	0,40678615	0,31788657	0	0	33,05665400
9	(Artigo 08) SCC 0	54,00	CLASSE 2 (50-80)	4,40840100	1,06667970	1,41548340	28,24496500	0,04310068	0,00272211	0,01875527	0,04005005	2,21215480	0,43773699	0,34593090	0	0	33,54452000
10	(Artigo 06) FA 40	56,30	CLASSE 2 (50-80)	5,29381490	1,19095590	1,39605280	30,58273400	0,04550698	0,00301103	0,02193750	0,03888633	1,90873170	0,52399964	0,36729611	0	0	34,46014500
11	(Artigo 06) GGBFS 40	67,50	CLASSE 2 (50-80)	12,93557800	1,25816910	1,56957350	33,21879400	0,04762630	0,00314117	0,02501335	0,04654099	2,29685330	0,55531063	0,39258037	0	0	35,47046400
12	(Artigo 07) CFL 70-30-0	51,00	CLASSE 2 (50-80)	5,60216410	1,36501280	1,57275870	31,42134700	0,04873451	0,00309895	0,02200824	0,04211557	2,12879600	0,50851148	0,35198671	0	0	37,96195200
13	(Artigo 06) FA 30	59,00	CLASSE 2 (50-80)	5,39087950	1,26240600	1,56691020	32,43464800	0,04927127	0,00313941	0,02236870	0,04218683	2,05695440	0,54212032	0,37069440	0	0	38,46525800
14	(Artigo 06) GGBFS 30	62,00	CLASSE 2 (50-80)	11,12220200	1,31281590	1,69705070	34,41169300	0,05086076	0,00323701	0,02467558	0,04792783	2,34804570	0,56560356	0,38965759	0	0	39,22299700
15	(Artigo 15) G45	61,70	CLASSE 2 (50-80)	5,72137810	1,52289190	1,78334690	32,88831100	0,05244923	0,00318087	0,02208911	0,04558059	2,25730420	0,50931428	0,32414489	0	0	42,71269000
16	(Artigo 06) FA 20	67,00	CLASSE 2 (50-80)	5,48794390	1,33385600	1,73776770	34,28656300	0,05303555	0,00326778	0,02279989	0,04548733	2,20517720	0,56024099	0,37409268	0	0	42,47037100
17	(Artigo 15) G30	64,60	CLASSE 2 (50-80)	5,81141660	1,53276320	1,79027580	33,19425200	0,05286178	0,00321847	0,02238933	0,04592159	2,28068600	0,51544650	0,33190417	0	0	42,88585600
18	(Artigo 15) G15	66,40	CLASSE 2 (50-80)	5,90145510	1,54263450	1,79720470	33,50019200	0,05327433	0,00325607	0,02268956	0,04626258	2,30406790	0,52157872	0,33966345	0	0	43,05902100
19	(Artigo 15) G0	67,40	CLASSE 2 (50-80)	6,00159320	1,55512300	1,80481660	33,81946300	0,05371602	0,00329638	0,02301008	0,04662726	2,32900920	0,52784017	0,34757131	0	0	43,24511100
20	(Artigo 06) GGBFS 20	58,70	CLASSE 2 (50-80)	9,30882560	1,36746260	1,82452800	35,60459300	0,05409521	0,00333286	0,02433781	0,04931466	2,39923800	0,57589649	0,38673481	0	0	42,97553000
21	(Artigo 04) RM 0	80,50	CLASSE 2 (50-80)	6,38967090	1,61476150	1,76480010	35,13906800	0,05365531	0,00343351	0,02505161	0,04666137	2,25121760	0,57321489	0,36662208	0	0	42,79501700
22	(Artigo 04) RM 10	81,00	CLASSE 2 (50-80)	6,73345990	1,62575220	1,78056370	36,04959500	0,05465730	0,00352686	0,02609340	0,04740144	2,29423480	0,59250470	0,37834705	0	0	43,18828700
23	(Artigo 12) M10-400-30%	51,60	CLASSE 2 (50-80)	6,04307090	1,49457960	1,88367650	35,24124000	0,05599091	0,00337394	0,02343690	0,04817764	2,37886110	0,55233871	0,35472397	0	0	45,33346700
24	(Artigo 12) M9-400-20%	53,20	CLASSE 2 (50-80)	6,07483620	1,49661700	1,88756180	35,34347700	0,05614369	0,00338640	0,02353664	0,04834759	2,39746820	0,55386330	0,35861763	0	0	45,39277800
25	(Artigo 12) M8-400-10%	59,40	CLASSE 2 (50-80)	6,10660150	1,49865440	1,89144700	35,44571400	0,05629647	0,00339887	0,02363638	0,04851753	2,41607540	0,55538788	0,36251128	0	0	45,45208900
26	(Artigo 12) M13-450-0%	67,70	CLASSE 2 (50-80)	6,23833150	1,53326190	1,89871740	35,41430900	0,05640275	0,00340790	0,02377184	0,04864537	2,42907770	0,55166619	0,35917904	0	0	45,51280300
27	(Artigo 04) RM 20	81,00	CLASSE 2 (50-80)	7,05704960	1,63150840	1,79496140	36,93346100	0,05560101	0,00361480	0,02709461	0,04809414	2,33413310	0,61153607	0,38977487	0	0	43,55570800
28	(Artigo 12) M7-400-0%	62,20	CLASSE 2 (50-80)	6,18280510	1,51220770	1,89833740	35,60660600	0,05657745	0,00342323	0,02382542	0,04879166	2,44154420	0,55748103	0,36705867	0	0	45,56826900
29	(Artigo 09) 4	55,30	CLASSE 2 (50-80)	5,46690880	1,54273400	2,01686580	34,79324200	0,05695269	0,00324383	0,02150883	0,04916552	2,33533780	0,52347388	0,30754950	0	0	48,51493100
30	(Artigo 04) RM 30	82,00	CLASSE 2 (50-80)	7,40219030	1,64258560	1,81079320	37,84801300	0,05660697	0,00370856	0,02814100	0,04883748	2,37731390	0,63091482	0,40155113	0	0	43,95078900
31	(Artigo 04) RM 40	83,00	CLASSE 2 (50-80)	7,78772940	1,66413190	1,82935690	38,81589000	0,05772949	0,00381314	0,02926858	0,04967552	2,42673260	0,65081044	0,41392169	0	0	44,39756800
32	(Artigo 11) M1	60,96	CLASSE 2 (50-80)	6,24466790	1,68103720	2,05058510	36,89467100	0,05926788	0,00351840	0,02416305	0,05154058	2,52607720	0,56575282	0,35568408	0	0	49,12615200
33	(Artigo 13) W4.3	65,20	CLASSE 2 (50-80)	5,67391810	1,53785770	2,09208740	36,99492600	0,05987659	0,00344035	0,02293307	0,05177220	2,51148000	0,56561089	0,35356873	0	0	50,36392600
34	(Artigo 12) M18-450-50%	53,60	CLASSE 2 (50-80)	6,26391910	1,61336430	2,07121150	37,42157100	0,05999826	0,00352666	0,02428795	0,05174815	2,50636590	0,57690214	0,35039305	0	0	49,79091900
35	(Artigo 12) M17-450-40%	55,80	CLASSE 2 (50-80)	6,29411180	1,61530040	2,07490380	37,51873600	0,06014346	0,00353851	0,02438274	0,05190965	2,52404810	0,57835114	0,35409380	0	0	49,84728700
36	(Artigo 06) CONTROLE	69,00	CLASSE 2 (50-80)	5,68207290	1,47675610	2,07948250	37,99039200	0,06056412	0,00352454	0,02366228	0,05208833	2,50162270	0,59648235	0,38088926	0	0	50,48059600
37	(Artigo 12) M16-450-30%	58,50	CLASSE 2 (50-80)	6,42429080	1,64314730	2,08535760	37,74787700	0,06057711	0,00357713	0,02467845	0,05230556	2,55716880	0,58107941	0,35926546	0	0	50,03160900
38	(Artigo 12) M15-450-20%	61,60	CLASSE 2 (50-80)	6,45497160	1,64522630	2,08925450	37,84885800	0,06072923	0,00358958	0,02477691	0,05247618	2,57599790	0,58257719	0,36305898	0	0	50,09037900
39	(Artigo 07) CFL 100-0-0	53,90	CLASSE 2 (50-80)	6,01053480	1,60778460	2,11558790	37,55447300	0,06094844	0,00354367	0,02372141	0,05282021	2,61479770	0,57209085	0,36866800	0	0	50,69962300
40	(Artigo 12) M14-450-10%	65,20	CLASSE 2 (50-80)	6,48468580	1,64702210	2,09274610	37,94228300	0,06086764	0,00360083	0,02486811	0,05262875	2,59255570	0,58397836	0,36666877	0	0	50,14439300
41	(Artigo 01) 500C-OCR	52,95	CLASSE 2 (50-80)	5,38478990	1,56308040	2,21483110	36,84828100	0,06076534	0,00334169	0,02184461	0,05327780	2,62261610	0,54022869	0,32595957	0	0	52,72825000
42	(Artigo 13) G4.2	58,50	CLASSE 2 (50-80)	5,93565970	1,61766120	2,16001470	37,97644800	0,06170215	0,00354728	0,02363907	0,05337043	2,59147690	0,57748539	0,35960848	0	0	51,91342100
43	(Artigo 11) M2	64,38	CLASSE 2 (50-80)	11,43778200	1,85548200	2,22654800	39,41916700	0,06162329	0,00366855	0,02710409	0,05776437	2,82103070	0,59485398	0,36189857	0	0	51,13346200
44	(Artigo 13) W2.2	68,20	CLASSE 2 (50-80)	5,95958400	1,63931800	2,23309960	38,91909000	0,06329357	0,00360530	0,02394201	0,05482359	2,65063310	0,59007785	0,36360194	0	0	53,67646500
45	(Artigo 13) G2.2	68,30	CLASSE 2 (50-80)	6,18327270	1,70940040	2,29842490	39,84922000	0,06500831	0,00370198	0,02457089	0,05633094	2,72451110	0,60144291	0,36901006	0	0	55,17695200
46	(Artigo 09) 14	59,90	CLASSE 2 (50-80)	5,86955990	1,77297490	2,39917270	39,09800600	0,06508027	0,00354748	0,02306834	0,05659244	2,64707820	0,56839903	0,30839995	0	0	57,43607300
47	(Artigo 09) 15	50,30	CLASSE 2 (50-80)	5,95672030	1,80785710	2,39857830	39,01148300	0,06507849	0,00355511	0,02312711	0,05646296	2,61550870	0,56638515	0,30075582	0	0	57,47595600
48	(Artigo 11) M3	66,78	CLASSE 2 (50-80)	16,61530600	2,01597150	2,40016570	41,90751800	0,06385218	0,00380649	0,02996823							

Quadro B3 (continuação) - Resultados da ACV completa da classe de resistência 2

POSIÇÃO DO TRAÇO NO RAKING DA ACV	NOME DO TRAÇO NO ARTIGO (UNIDADE FUNCIONAL: 1 m³)	Fck 28 Dias (Mpa)	CLASSE DE RESISTÊNCIA			CATEGORIA DE DANOS (ENDPOINT CATEGORY)									Intensidade de Impacto Total (mPt/MPa)
				Energia Não Renovável (mPt)	Extração Mineral (mPt)	Saúde Humana (DALY)	Qualidade do Ecossistema (PDF*m2*yr)	Mudanças Climáticas (Kg CO2 Eq)	Recursos (MJ Primary)	Pontuação Única (mPt)	Saúde Humana (mPt)	Qualidade do Ecossistema (mPt)	Mudanças Climáticas (mPt)	Recursos (mPt)	
1	(Artigo 02) F 30 C 15	58,00	CLASSE 2 (50-80)	11,82046300	0,12530719	0,00018828	37,09668000	124,4881	1815,4666	53,774	26,5473	2,7081	12,5733	11,9458	0,93
2	(Artigo 02) F 20 C 15	63,00	CLASSE 2 (50-80)	12,10894600	0,14044489	0,00019561	39,09693100	128,3930	1861,6096	55,652	27,5805	2,8541	12,9677	12,2494	0,88
3	(Artigo 02) F 10 C 15	68,00	CLASSE 2 (50-80)	12,39491100	0,15583352	0,00020295	41,11939100	132,2866	1907,4080	57,530	28,6163	3,0017	13,3609	12,5507	0,85
4	(Artigo 02) F 00 C 15	62,00	CLASSE 2 (50-80)	12,71903500	0,17216395	0,00021107	43,30182600	136,6304	1959,1487	59,612	29,7605	3,1610	13,7997	12,8912	0,96
5	(Artigo 02) F 00 C 25	66,00	CLASSE 2 (50-80)	13,09093300	0,16365443	0,00021550	43,19499500	139,7938	2014,3750	60,912	30,3852	3,1532	14,1192	13,2546	0,92
6	(Artigo 08) SCC 100	51,00	CLASSE 2 (50-80)	12,06674800	0,02122189	0,00018559	36,27814400	302,9511	1837,0774	71,503	26,1686	2,6483	30,5981	12,0880	1,40
7	(Artigo 08) SCC 40	53,00	CLASSE 2 (50-80)	13,55286400	0,02596101	0,00020477	39,39847000	320,4205	2063,6512	77,690	28,8724	2,8761	32,3625	13,5788	1,47
8	(Artigo 08) SCC 20	54,00	CLASSE 2 (50-80)	14,20184900	0,02801509	0,00021252	40,69607700	327,2936	2162,5933	80,222	29,9650	2,9708	33,0567	14,2299	1,49
9	(Artigo 08) SCC 0	54,00	CLASSE 2 (50-80)	14,53268700	0,02900728	0,00021838	41,58729800	332,1240	2213,0234	81,934	30,7917	3,0359	33,5445	14,5617	1,52
10	(Artigo 06) FA 40	56,30	CLASSE 2 (50-80)	15,75648600	0,03483330	0,00023575	38,88923000	341,1896	2399,8965	86,331	33,2402	2,8389	34,4601	15,7913	1,53
11	(Artigo 06) GGBFS 40	67,50	CLASSE 2 (50-80)	16,39896200	0,08511611	0,00025619	45,08610000	351,1927	2505,1790	91,368	36,1223	3,2913	35,4705	16,4841	1,35
12	(Artigo 07) CFL 70-30-0	51,00	CLASSE 2 (50-80)	16,93585900	0,03686224	0,00024421	41,52616100	375,8609	2579,4409	92,399	34,4330	3,0314	37,9620	16,9727	1,81
13	(Artigo 06) FA 30	59,00	CLASSE 2 (50-80)	16,67974600	0,03547199	0,00025063	41,25967100	380,8441	2540,3067	93,531	35,3387	3,0120	38,4653	16,7152	1,59
14	(Artigo 06) GGBFS 30	62,00	CLASSE 2 (50-80)	17,16160300	0,07318409	0,00026596	45,90732400	388,3465	2619,2686	97,309	37,5003	3,3512	39,2230	17,2348	1,57
15	(Artigo 15) G45	61,70	CLASSE 2 (50-80)	17,98482800	0,03764667	0,00025725	42,96361600	422,8979	2738,9780	100,144	36,2723	3,1363	42,7127	18,0225	1,62
16	(Artigo 06) FA 20	67,00	CLASSE 2 (50-80)	17,60300700	0,03611067	0,00026551	43,63011200	420,4987	2680,7169	100,732	37,4373	3,1850	42,4704	17,6391	1,50
17	(Artigo 15) G30	64,60	CLASSE 2 (50-80)	18,16430900	0,03823912	0,00025954	43,47888100	424,6124	2766,3447	100,858	36,5958	3,1740	42,8859	18,2025	1,56
18	(Artigo 15) G15	66,40	CLASSE 2 (50-80)	18,34379000	0,03883157	0,00026184	43,99414600	426,3269	2793,7114	101,572	36,9193	3,2116	43,0590	18,3826	1,53
19	(Artigo 15) G0	67,40	CLASSE 2 (50-80)	18,54318400	0,03949048	0,00026425	44,53490300	428,1694	2824,1146	102,338	37,2594	3,2510	43,2451	18,5827	1,52
20	(Artigo 06) GGBFS 20	58,70	CLASSE 2 (50-80)	17,92424400	0,06125207	0,00027573	46,72854700	425,5003	2733,3581	103,251	38,8783	3,4112	42,9755	17,9855	1,76
21	(Artigo 04) RM 0	80,50	CLASSE 2 (50-80)	18,92742800	0,04204403	0,00027376	44,35227300	423,7130	2882,8986	103,603	38,6008	3,2377	42,7950	18,9695	1,29
22	(Artigo 04) RM 10	81,00	CLASSE 2 (50-80)	19,33087400	0,04430617	0,00028043	45,37654800	427,6068	2944,5562	105,416	39,5402	3,3125	43,1883	19,3752	1,30
23	(Artigo 12) M10-400-30%	51,60	CLASSE 2 (50-80)	18,79719700	0,03976341	0,00027448	45,67262200	448,8462	2862,7599	106,207	38,7023	3,3341	45,3335	18,8370	2,06
24	(Artigo 12) M9-400-20%	53,20	CLASSE 2 (50-80)	18,85552300	0,03997242	0,00027525	46,00406500	449,4335	2871,6558	106,457	38,8107	3,3583	45,3928	18,8955	2,00
25	(Artigo 12) M8-400-10%	59,40	CLASSE 2 (50-80)	18,91384800	0,04018144	0,00027602	46,33550800	450,0207	2880,5516	106,708	38,9191	3,3825	45,4521	18,9540	1,80
26	(Artigo 12) M13-450-0%	67,70	CLASSE 2 (50-80)	19,08228900	0,04104822	0,00027610	46,41874400	450,6218	2906,2823	106,955	38,9299	3,3886	45,5128	19,1233	1,58
27	(Artigo 04) RM 20	81,00	CLASSE 2 (50-80)	19,69449300	0,04643539	0,00028685	46,34983800	431,2446	3000,1410	107,126	40,4462	3,3835	43,5557	19,7409	1,32
28	(Artigo 12) M7-400-0%	62,20	CLASSE 2 (50-80)	19,05979200	0,04068286	0,00027731	46,77911700	451,1710	2902,8077	107,185	39,1010	3,4149	45,5683	19,1005	1,72
29	(Artigo 09) 4	55,30	CLASSE 2 (50-80)	18,65808300	0,03597226	0,00027259	44,04831100	480,3459	2841,0418	108,859	38,4345	3,2155	48,5149	18,6941	1,97
30	(Artigo 04) RM 30	82,00	CLASSE 2 (50-80)	20,09965400	0,04870641	0,00029355	47,37832000	435,1563	3062,0608	108,948	41,3898	3,4586	43,9508	20,1484	1,33
31	(Artigo 04) RM 40	83,00	CLASSE 2 (50-80)	20,58446800	0,05124326	0,00030071	48,50877000	439,5799	3136,1263	110,975	42,4002	3,5411	44,3976	20,6357	1,34
32	(Artigo 11) M1	60,96	CLASSE 2 (50-80)	20,00954500	0,04108992	0,00028875	47,93225600	486,3976	3047,2089	113,389	40,7132	3,4991	49,1262	20,0506	1,86
33	(Artigo 13) W4.3	65,20	CLASSE 2 (50-80)	19,39152600	0,03733438	0,00028873	47,70454600	498,6527	2952,7144	113,986	40,7111	3,4824	50,3639	19,4289	1,75
34	(Artigo 12) M18-450-50%	53,60	CLASSE 2 (50-80)	19,91533400	0,04121659	0,00029216	47,74533200	492,9794	3032,9104	114,427	41,1940	3,4854	49,7909	19,9566	2,13
35	(Artigo 12) M17-450-40%	55,80	CLASSE 2 (50-80)	19,97076400	0,04141526	0,00029289	48,06031000	493,5375	3041,3647	114,665	41,2970	3,5084	49,8473	20,0122	2,05
36	(Artigo 06) CONTROLE	69,00	CLASSE 2 (50-80)	19,44952700	0,03738804	0,00029528	48,37099400	499,8079	2961,5373	115,133	41,6344	3,5311	50,4806	19,4869	1,67
37	(Artigo 12) M16-450-30%	58,50	CLASSE 2 (50-80)	20,22333500	0,04227183	0,00029479	48,62766100	495,3625	3079,8795	115,412	41,5652	3,5498	50,0316	20,2656	1,97
38	(Artigo 12) M15-450-20%	61,60	CLASSE 2 (50-80)	20,28134800	0,04247371	0,00029555	48,96041500	495,9444	3088,7267	115,661	41,6724	3,5741	50,0904	20,3238	1,88
39	(Artigo 07) CFL 100-0-0	53,90	CLASSE 2 (50-80)	20,04218900	0,03954932	0,00029338	49,42981900	501,9765	3051,9359	115,756	41,3661	3,6084	50,6996	20,0817	2,15
40	(Artigo 12) M14-450-10%	65,20	CLASSE 2 (50-80)	20,33424700	0,04266923	0,00029625	49,25796600	496,4791	3096,7958	115,889	41,7714	3,5958	50,1444	20,3769	1,78
41	(Artigo 01) 500C-OCR	52,95	CLASSE 2 (50-80)	19,24268700	0,03543192	0,00028874	48,52167300	522,0619	2929,8053	116,261	40,7121	3,5421	52,7283	19,2781	2,20
42	(Artigo 13) G4.2	58,50	CLASSE 2 (50-80)	20,12072300	0,03905664	0,00029676	49,06768700	513,9943	3063,7963	117,498	41,8430	3,5819	51,9134	20,1598	2,01
43	(Artigo 11) M2	64,38	CLASSE 2 (50-80)	21,01447400	0,07526061	0,00030917	52,54174900	506,2719	3205,1268	119,652	43,5936	3,8355	51,1335	21,0897	1,86
44	(Artigo 13) W2.2	68,20	CLASSE 2 (50-80)	20,46446700	0,03921406	0,00030413	50,12515800	531,4502	3116,0609	120,722	42,8823	3,6591	53,6765	20,5037	1,77
45	(Artigo 13) G2.2	68,30	CLASSE 2 (50-80)	21,11883000	0,04068594	0,00031170	51,38760300	546,3065	3215,7319	124,038	43,9503	3,7513	55,1770	21,1595	1,82
46	(Artigo 09) 14	59,90	CLASSE 2 (50-80)	20,88891800	0,03862170	0,00030753	49,04752900	568,6740	3180,4772	125,306	43,3619	3,5805	57,4361	20,9275	2,09
47	(Artigo 09) 15	50,30	CLASSE 2 (50-80)	21,04385700	0,03919522	0,00030716	48,48099500	569,0689	3204,1113	125,408	43,3097	3,5391	57,4760	21,0831	2,49
48	(Artigo 11) M3	66,78	CLASSE 2 (50-80)	21,91952700	0,10932872	0,00032923	57,06724000	525,6560	3347,8505	125,707	46,4213	4,1659	53,0913	22,0289	1,88
49	(Artigo 13) W0	70,50	CLASSE 2 (50-80)	21,46297000	0,04105006	0,00031804	52,33163900	560,7291	3268,0882	126,801	44,8436	3,8202	56,6336	21,5040	1,80
50	(Artigo 13) G0	74,90	CLASSE 2 (50-80)	21,98524500	0,04218287	0,00032429	53,35558100	573,2082	3347,6334	129,541	45,7248	3,8950	57,8940	22,0274	1,73
51	(Artigo 11) M4	69,74	CLASSE 2 (50-80)	22,85856900	0,14351345	0,00034943	61,62522400	545,2351	3495,7572	131,840	49,2701	4,4986	55,0687	23,0021	1,89
52	(Artigo 02) OPC	68,00	CLASSE 2 (50-80)	22,42897100	0,04085984	0,00033645	55,62693300	619,6601	3414,8679	136,555	47,4392	4,0608	62,5857	22,4698	2,01
53	(Artigo 11) M5	65,06	CLASSE 2 (50-80)	23,60064700	0,17703939	0,00036848	65,94163100	563,5557	3613,6301	137,467	51,9560	4,8137	56,9191	23,7777	2,11
54	(Artigo 11) M6	64,27	CLASSE 2 (50-80)	24,37025500	0,21112506	0,00038803	70,35895800	582,3097	3735,7720	143,243	54,7123	5,1362	58,8133	24,5814	2,23

Fonte: Adaptado do SimaPro 8.2

APÊNDICE C

C. ENSAIOS DE REOLOGIA, PROPRIEDADES MECÂNICAS, DURABILIDADE E MICROESTRUTURA REALIZADOS PELAS PESQUISAS DOS ARTIGOS ANALISADOS

Quadro C1 - Ensaios de reologia, propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura realizados pelas pesquisas dos artigos analisados

	01 - ISMAIL e HASSAN	02 - NGUYEN <i>et. al.</i>	03 - SADRMOMTAZI <i>et. al.</i>	04 - LIU e POON	05 - GHERNOUTI <i>et al.</i>	06 - ZHAO <i>et. al.</i>	07 - CELIK <i>et. al.</i>	08 - PEREIRA-DE-OLIVEIRA <i>et al.</i>
Periódico	Journal of Cleaner Production (A1)	Construction and Building Materials (A1)	Journal of Cleaner Production (A1)	Journal of Cleaner Production (A1)	Construction and Building Materials (A1)	Journal of Cleaner Production (A1)	Cement & concrete composites (A1)	Construction and Building Materials (A1)
Ano de publicação	2016	2016	2016	2015	2015	2015	2015	2014
País de origem	Canadá	Taiwan/Vietnã	Irã	China/Hong Kong	Argélia	China	EUA/Turquia	Portugal
Cimento Utilizado no Artigo	ASTM Type I	ASTM Type I	ASTM Type II	ASTM Type I	CEM II/A 42.5 NA	Cimento Portland Chinês não especificado	ASTM Tipo I/II	CEM I 42.5R
Cimento Utilizado na Simulação do SimaPro	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA com 0-20% de substituição do Cimento	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA
Adição / Resíduo / subproduto utilizado	MC, EGAF, CV e BRRP	EGAF, CV, CVLFC	SA, CV e RPET	LV e CV	FRSP e PC	EGAF e CV	CV e PC	CR e PC
Reologia								
Consistência normal da pasta de cimento (<i>Normal consistency of paste</i>)							x	
Tempos de pega da pasta de cimento (<i>Setting times of paste</i>)							x	
Espalhamento (<i>slump flow test</i>)	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>T500mm slump flow speed test</i>				x			x	
Caixa L (<i>L-box test</i>)	x		x		x	x		
<i>J-ring test</i>		x		x				
Tempo de fluidez com funil-V (<i>V-funnel test</i>)			x					x
Taxa de segregação (<i>GTM screen stability test - Segregation ratio/resistance test - Sieve segregation/stability test</i>)	x				x	x		
Densidade do concreto no estado fresco (<i>wet density</i>)						x		
Teor de ar (<i>air content</i>)			x					
Propriedades mecânicas								
Resistência à compressão	2, 7 e 28 dias	7, 28 e 150 dias	7, 28, 60 e 90 dias	7, 28, 56 e 90 dias	28 dias	3, 7, 28, 90 dias	7, 28, 91 e 365 dias	7 e 28 dias
Resistência à tração - compressão diametral (<i>Splitting tensile strength test</i>)	28 dias		28 dias	28, 56 e 90 dias	28 dias	3, 7, 28, 90 dias		
Resistência à flexão			7, 28, 60 e 90 dias		28 dias			
Módulo de elasticidade estático (<i>static modulus of elasticity</i>)			28 dias	28 dias		28, 90 dias		
Módulo de elasticidade dinâmico (<i>dynamic modulus of elasticity</i>)		7, 28 e 150 dias						7 e 28 dias
Módulo de cisalhamento do concreto (<i>dynamic shear modulus</i>)		7, 28 e 150 dias						
Velocidade de propagação do pulso ultrassônico - VPU (<i>Ultrasonic pulse velocity- UPV</i>)		7, 28 e 150 dias	28 e 90 dias					
Densidade do concreto endurecido (<i>density</i>)			28 dias	28, 56 e 90 dias				7 e 28 dias
Durabilidade								
Carbonatação acelerada (<i>Accelerated carbonation</i>)						26+2+(3, 7, 14 e 28) dias		
Migração rápida de cloretos (<i>Rapid Chloride migration - RCM</i>)						28 dias		
Penetração rápida de cloretos (<i>Rapid Chloride Permeability/Penetration Test - RCTP</i>)		28 dias					365 dias	
<i>Non-steady state chloride migration test</i>								
Resistência a sulfatos (<i>sulphate resistance/attack</i>)								
Resistência química (<i>chemical resistance</i>)								
Reação Álcali-sílica (<i>Alkali-silica reaction</i>)								
Retração por secagem (<i>Drying shrinkage</i>)		1, 2, 4, 7, 14, 28 e 150 dias	7, 14, 28, 42, 60 e 90 dias	7+(1, 4, 7, 28, 56, 90 e 112) dias		1, 4, 7, 28, 56, 90 e 112 dias		
Absorção de água (<i>water absorption test</i>)	3 dias		28 dias				365 dias	28 dias
Porosidade ou Permeabilidade à água (<i>water porosity</i> ou <i>Water permeability</i>)				28 dias (porosidade)		3, 7, 28 e 90 dias (porosidade)		28 dias (permeabilidade)
Porosidade superficial/Penetração de água (<i>Water penetration</i>)	28 dias							28 dias
Permeabilidade ao ar/gases (<i>Air/Gas permeability test</i>)							365 dias (nitrogênio)	28 dias (oxigênio)
Resistividade elétrica (<i>Electrical resistivity</i>)			90 dias					
Microestrutura								
Microscopia eletrônica de varredura - MEV (<i>Scanning electron microscope-SEM</i>)		resíduos						
Difração de raio-x (<i>X-ray diffraction-XRD</i>)		resíduos		resíduo			filler e resíduo	

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro C1 (continuação) - Ensaio de reologia, propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura realizados pelas pesquisas dos artigos analisados

	09 - SUA-IAM e MAKUL	10 - HER YUNG <i>et. al.</i>	11 - GESOGLU <i>et. al.</i>	12 - ALI e AL-TERSAWY	13 - LIU	14 - GRDIC <i>et. al.</i>	15 - KOU e POON
Periódico	Construction and Building Materials (A1)	Construction and Building Materials (A1)	Journal of Hazardous Materials (A1)	Construction and Building Materials (A1)	Construction and Building Materials (A1)	Construction and Building Materials (A1)	Cement & concrete composites (A1)
Ano de publicação	2013	2013	2012	2012	2011	2010	2009
País de origem	Tailândia	Taiwan	Turquia	Egito	Reino Unido	Sérvia	Hong Kong
Cimento Utilizado no Artigo	ASTM Type I	ASTM Type I	CEM I 42.5 R	CEM I 42.5N	CEM I 42.5N	CEM II/B-M (S-Q) 42.5N	ASTM Type I
Cimento Utilizado na Simulação do SimaPro	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA	Cimento Portland EUA com 21-35% de substituição do Clínquer	Cimento Portland EUA
Adição / Resíduo / subproduto utilizado	RA	EGAF, CV e BRRP	AAE e CV	VR e SA	VR	CR e PC	CV e VR
Reologia							
Consistência normal da pasta de cimento (<i>Normal consistency of paste</i>)							
Tempos de pega da pasta de cimento (<i>Setting times of paste</i>)							
Espalhamento (<i>slump flow test</i>)	x	x	x	x	x	x	x
<i>T500mm slump flow speed test</i>	x		x				
Caixa L (<i>L-box test</i>)		x	x	x		x	x
<i>J-ring test</i>	x				x		
Tempo de fluidez com funil-V (<i>V-funnel test</i>)	x		x	x	x		
Taxa de segregação (<i>GTM screen stability test - Segregation ratio/resistance test - Sieve segregation/stability test</i>)		x			x	x	x
Densidade do concreto no estado fresco (<i>wet density</i>)							x
Teor de ar (<i>air content</i>)	x						x
Propriedades mecânicas							
Resistência à compressão	3, 7, 14, 28 e 91 dias	28 dias	28 dias	7 e 28 dias	7, 28, 90 e 180 dias	2, 7 e 28 dias	1, 4, 7, 28 e 90 dias
Resistência à tração - compressão diametral (<i>Splitting tensile strength test</i>)		28 dias		28 dias	28 e 90 dias	28 dias	28 e 90 dias
Resistência à flexão		28 dias		28 dias			
Módulo de elasticidade estático (<i>static modulus of elasticity</i>)				28 dias			28 e 90 dias
Módulo de elasticidade dinâmico (<i>dynamic modulus of elasticity</i>)					7, 28, 60, 90, 120, 10 e 180 dias		
Módulo de cisalhamento do concreto (<i>dynamic shear modulus</i>)							
Velocidade de propagação do pulso ultrassônico - VPU (<i>Ultrasonic pulse velocity- UPV</i>)	3, 7, 14, 28 e 91 dias				7, 28, 90 e 180 dias		
Densidade do concreto endurecido (<i>density</i>)							x (idade não espec.)
Durabilidade							
Carbonatação acelerada (<i>Accelerated carbonation</i>)							
Migração rápida de cloretos (<i>Rapid Chloride migration - RCM</i>)							
Penetração rápida de cloretos (<i>Rapid Chloride Permeability/Penetration Test - RCTP</i>)							28 e 90 dias
<i>Non-steady state chloride migration test</i>							
Resistência a sulfatos (<i>sulphate resistance/attack</i>)							
Resistência química (<i>chemical resistance</i>)							
Reação Álcali-silica (<i>Alkali-silica reaction</i>)					7, 14, 21, 28, 35 e 42 dias		1, 4, 7, 14 e 28 dias
Retração por secagem (<i>Drying shrinkage</i>)							28+(1, 4, 7, 28, 56, 90 e 112) dias
Absorção de água (<i>water absorption test</i>)					7 e 90 dias	3 dias	
Porosidade ou Permeabilidade à água (<i>water porosity</i> ou <i>Water permeability</i>)							
Porosidade superficial/Penetração de água (<i>Water penetration</i>)						28 dias	
Permeabilidade ao ar/gases (<i>Air/Gas permeability test</i>)							
Resistividade elétrica (<i>Electrical resistivity</i>)							
Microestrutura							
Microscopia eletrônica de varredura - MEV (<i>Scanning electron microscope-SEM</i>)	cimento, areia e resíduo						
Difração de raio-x (<i>X-ray diffraction-XRD</i>)	cimento, areia e resíduo						

Fonte: Elaborado pelo autor