

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRUNO ATHAÍDE BACELAR

Avaliação de impactos ambientais da produção de vigas protendidas de Concretos
de Alto Desempenho com substituição parcial de cimento

BELO HORIZONTE
2020

Avaliação de impactos ambientais da produção de vigas protendidas de Concretos
de Alto Desempenho com substituição parcial de cimento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Péter Ludvig

Coorientador: Prof. Dr. Lineker Max Goulart Coelho

BELO HORIZONTE

2020

B117a Bacelar, Bruno Athaíde
Avaliação de impactos ambientais da produção de vigas protendidas de Concretos de Alto Desempenho com substituição parcial de cimento / Bruno Athaíde Bacelar. – 2020.
100 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientador: Péter Ludvig.
Coorientador: Lineker Max Goulart Coelho.
Bibliografia: f. 94-100.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Concreto de alta resistência – Teses. 2. Cinza de casca de arroz – Teses. 3. Cinza de bagaço de cana – Teses. 4. Cimento reforçado com fibras – Teses. 5. Ciclo de vida do produto – Avaliação – Teses. 6. Construção sustentável – Teses. I. Ludvig, Péter. II. Coelho, Lineker Max Goulart. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 691.3

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Sônia, por todo o incentivo durante
minha vida para que esse se tornasse possível

Ao meu pai, Hélio. Nunca deixarei de sentir sua falta.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meu orientador, Péter, por todos os ensinamentos e oportunidades nesses anos do Mestrado.

Ao meu coorientador, Lineker, pelo auxílio e observações feitas que me ajudaram muito.

À Stela, por todo companheirismo e apoio nesses anos. Não sei se teria encarado a vida acadêmica sem você ao meu lado.

Às minhas amigas Maíra e Marília. Obrigado pela paciência e pelos dias de kibe.

À Fernanda, pela companhia e por ter se tornado tão importante em pouco tempo.

Às minhas amigas do grupo de pesquisa e da vida, Isabela e Elayne. Pelos dias moldagens, conversas e brincadeiras no subsolo.

A todos os amigos e familiares que não foram citados, mas são importantes na minha vida.

À professora Gláucia Nolasco, que sempre me incentivou e ajudou a buscar a área acadêmica.

Ao professor Conrado e à colega Renata pela ajuda e disponibilização das cinzas utilizadas na pesquisa.

Às professoras Júnia e Sofia pelas participações nas bancas de qualificação e defesa e pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

À CAPES, FAPEMIG, CNPQ e CEFET-MG pelo financiamento e apoio à pesquisa.

*[...] In all our searching, the only thing
we've found that makes the emptiness
bearable is each other.*
Carl Sagan

RESUMO

Concretos de Alto Desempenho (CAD) e concretos de ultra alto desempenho (CUAD) possuem durabilidade e propriedades mecânicas superiores ao concreto convencional. Para sua produção são utilizados modelos de empacotamento de partículas para a otimização das composições. A utilização do CAD ou CUAD possibilita a construção de estruturas mais leves, com menores seções transversais, que podem resultar na redução de impactos ambientais. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo mensurar os impactos ambientais causados pelo CAD e avaliar se as reduções em consumo de materiais compensam os impactos causados pela grande quantidade de cimento utilizado. Corpos de prova de CAD foram desenvolvidos para avaliação das propriedades mecânicas, que foram utilizadas no dimensionamento de vigas protendidas. A avaliação do ciclo de vida (ACV) foi realizada para a produção de 1 m³ de concreto e de uma viga protendida para comparação dos impactos ambientais com o concreto convencional nos dois casos. Cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar foram avaliadas como substituição parcial de cimento. Como resultado, obteve-se que o dimensionamento de uma viga protendida em CAD pode reduzir o consumo de concreto em 46,5%, aumentando o consumo de cimento na estrutura em 11%. A análise dos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida indicou que, embora o CAD seja um concreto com maiores impactos ambientais para a produção de um volume de 1 m³, a possibilidade de reduções das seções transversais pode diminuir os impactos ambientais da produção de vigas protendidas. A substituição de cimento pelas cinzas pode ter efeitos positivos no concreto, reduzindo o consumo de cimento em relação à produção da viga em concreto convencional. Entretanto, é necessário levar em consideração as distâncias de transporte e a avaliação de todas as categorias de impactos ambientais para a definição de cinzas ou quaisquer na produção do CAD.

Palavras-chave: CAD, CUAD, Cinza da Casca de Arroz, Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar, Avaliação do Ciclo de Vida, Sustentabilidade.

ABSTRACT

High Performance Concrete (HPC) is a concrete with high durability and mechanical properties. HPC 's durability and compressive strength are obtained using particle packing models to optimize compositions. HPC's could, potentially, enable the construction of lighter structures, with smaller cross sections, which can result in reduced environmental impacts. In this context, the present study aimed to measure the environmental impacts caused by HPC and to assess whether the reductions in material consumption offset the impacts caused by the large amount of cement used. HPC specimens were developed to evaluate the mechanical properties, which were used in the design of prestressed girder. The life cycle assessment (LCA) was carried out for the production of 1 m³ of concrete and a prestressed girder to compare environmental impacts with conventional concrete in both cases. Rice husk ash and sugarcane bagasse ash were evaluated as partial replacement of cement. As a result, it was observed that the dimensioning of a prestressed girder in UHPC can reduce the consumption of concrete by 46.5%, increasing the consumption of cement in the structure by 11%. The analysis of the results of the Life Cycle Assessment indicated that, although UHPC is a concrete with greater environmental impacts for the production of 1 m³, the possibility of reductions in cross sections can reduce the environmental impacts of the production of prestressed girders. The substitution of cement for ashes can be positive in concrete, reducing the consumption of cement in relation to the production of the girder in conventional concrete. However, it is necessary to take into account transport distances and the assessment of all categories of environmental impacts for the definition of ashes or any in the production of HPC.

Keywords: Ultra High Performance Concrete, Rice Husk Ash, Sugarcane Bagasse Ash, Life Cycle Assessment, Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Três passos para a sustentabilidade na construção civil	19
Figura 2 – Materiais aglomerantes e agregados utilizados nos artigos citados na revisão bibliográfica.....	25
Figura 3 – Comparação entre os modelos de Andreasen & Andersen e Andreasen & Andersen modificado.....	29
Figura 4 – Etapas de uma ACV.....	33
Figura 5 – Comparação de categorias de impacto entre CUAD e concreto convencional	37
Figura 6 – Comparação de categorias de impacto considerando redução do consumo de concreto.....	38
Figura 7 – Comparação dos impactos ambientais entre ponte em concreto convencional e ponte em CUAD	39
Figura 8 – Distribuição granulométrica dos materiais escolhidos.....	42
Figura 9 – (a) cinza de casca de arroz e (b) cinza do bagaço da cana de açúcar	45
Figura 10 – Corpo de prova cilíndrico de CUAD	48
Figura 11 – Máquina universal de ensaios EMIC	48
Figura 12 – Seção transversal do projeto original da viga (medidas em cm)	50
Figura 13 – Vista longitudinal da ponte com vigas protendidas	51
Figura 14 – Seção transversal da ponte com vigas protendidas	52
Figura 15 – Carga móvel rodoviária padrão TB-450	54
Figura 16 – Fronteira do sistema.....	55
Figura 17 – Cenário 1: considerado na ACV	56
Figura 18 – Cenário 2: Viga protendida em concreto convencional x em CUAD	57
Figura 19 – Cenário 3: CUAD com cura convencional x CUAD com cura a vapor....	57
Figura 20 – Resultados do índice de consistência para os diferentes traços de CUAD	63
Figura 21 – (a) Seção transversal da viga protendida em concreto convencional e (b) Seção transversal da viga protendida em CUAD (medidas em cm).....	69
Figura 22 – Resultados da AICV do CUAD por m ³ com normalização baseada no concreto convencional.....	71
Figura 23 – Contribuições dos materiais nos impactos ambientais do concreto convencional	71
Figura 24 – Contribuições dos materiais nos impactos ambientais do CUAD.....	72

Figura 25 – Impactos de toxicidade humana da sílica ativa em comparação ao concreto convencional.....	74
Figura 26 - Resultados da AICV normalizados por MPa	75
Figura 27 – ACV do CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CCA	77
Figura 28 – ACV do CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CBCA	77
Figura 29 –ACV da viga protendida de CUAD produzida sob cura convencional	78
Figura 30 – Impactos ambientais para as vigas protendidas: (a) Aquecimento Global a longo prazo, (b) consumo de combustíveis fósseis e nuclear, (c) toxicidade humana cancerígena e (d) depleção da camada de ozônio.....	80
Figura 31 – ACV da viga protendida de CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CCA	82
Figura 32 – ACV da viga protendida de CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CBCA.....	83
Figura 33 - ACV comparativa de vigas de CUAD submetidas aos regimes de cura convencional e a vapor	84
Figura 34 – Contribuição da cura a vapor no Aquecimento Global a longo prazo nas vigas em CUAD.....	85
Figura 35 - Contribuição da cura a vapor no Consumo de combustíveis fósseis e nuclear nas vigas em CUAD	85
Figura 36 - Contribuição da cura a vapor na Depleção da Camada de Ozônio nas vigas em CUAD	86
Figura 37 – ACV realizada com a metodologia AICV Recipe 2016 <i>midpoint</i> (H)	87
Figura 38 – Contribuições dos materiais da viga protendida em CUAD no consumo de recursos hídricos nas categorias Impact World+ e Recipe 2016 <i>midpoint</i> (H)	87
Figura 39 – ACV realizada do CUAD com sílica ativa como resíduo	89
Figura 40 – ACV da viga protendida em CUAD com a consideração da sílica ativa como rejeito.....	89
Figura 41 – Resultados da AICV para o CUAD com a sílica ativa sem alocação: (a) Aquecimento Global, longo prazo, (b) Consumo de combustíveis fósseis e nuclear, (c) Toxicidade humana cancerígena e (d) Depleção da camada de ozônio.....	90
Figura 42 – Diagrama de esforços cortantes em kN	101
Figura 43 – Diagrama de Momento fletor em kNm.....	101

Figura 44 – Seção transversal das vigas em CUAD	101
Figura 45 – Estado Limite Último CUAD	107
Figura 46 – Estado Limite Último CCA10	111
Figura 47 – Estado Limite Último CCA20	115
Figura 48 – Estado Limite Último CBCA10	119
Figura 49 – Estado Limite Último CBCA20	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais empregados na produção de CUADs e as respectivas resistências à compressão obtidas nos artigos da revisão teórica	26
Tabela 2 – Metodologias AICV e suas categorias de impacto	35
Tabela 3 – Densidade dos materiais utilizados na produção do CUAD	42
Tabela 4 – Combinações de materiais para a dosagem dos CUADs	44
Tabela 5 – Definição do traço de CUAD.	44
Tabela 6 – Traços de CUAD em kg/m ³	45
Tabela 7 – Traço definido de concreto convencional para $f_{ck} = 30$ MPa	46
Tabela 8 – Materiais para a viga protendida em concreto convencional $f_{ck} = 30$ MPa	50
Tabela 9 – Sílica Ativa	58
Tabela 10 – Produção de 1 kg de superplastificante	58
Tabela 11 – Processos de entrada para o Concreto Convencional	59
Tabela 12 - Processos de entrada para o CUAD	59
Tabela 13 – Distâncias de transporte dos materiais	59
Tabela 14 – Processos da base de dados Ecoinvent utilizados no <i>software OpenLCA</i>	60
Tabela 15 – Categorias de impacto da metodologia <i>Impact World+</i>	61
Tabela 16 – Categorias de impacto ambiental da metodologia Recipe 2016 <i>midpoint</i> (H)	62
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão	64
Tabela 18 – f_{ck} s dos CUADs produzidos	65
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão	66
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de Módulo de Elasticidade	67
Tabela 21 – Propriedades mecânicas dos concretos convencional e CUAD	68
Tabela 22 – Consumo de materiais nas vigas protendidas de concreto convencional e CUAD sob cura convencional	68
Tabela 23 – Consumo total de cimento nas vigas protendidas	69
Tabela 24 – Resultados dos ensaios mecânicos do CUAD submetido ao regime de cura a vapor	69
Tabela 25 – Consumo de materiais nas vigas protendidas de concreto convencional e CUAD sob cura a vapor	70
Tabela 26 – Valores de resistência à compressão dos traços de CUAD produzidos	74

Tabela 27 – Impacto do diesel nos impactos ambientais do CUAD com CCA	78
Tabela 28 – Fluxos e processos com maior impacto nas categorias de impacto da viga protendida em CUAD	81
Tabela 29 – Propriedades da seção transversal	102
Tabela 30 – Tensões devidas aos diversos carregamentos	103
Tabela 31 – Perdas de protensão por atrito CUAD	104
Tabela 32 – Perdas por acomodação das ancoragens CUAD	104
Tabela 33 – Perdas por cravação consecutiva CUAD	105
Tabela 34 – Protensão final CUAD	105
Tabela 35 – Combinações permanentes CUAD	105
Tabela 36 – Combinações quase permanentes CUAD	106
Tabela 37 – Combinações frequentes CUAD	106
Tabela 38 – Combinações Raras CUAD	107
Tabela 39 – Perdas de protensão por atrito CCA10	108
Tabela 40 – Perdas por acomodação das ancoragens CCA10	108
Tabela 41 – Perdas por cravação consecutiva CCA10	109
Tabela 42 – Protensão final CCA10	109
Tabela 43 – Combinações permanentes CCA10	109
Tabela 44 – Combinações quase permanentes CCA10	110
Tabela 45 – Combinações frequentes CCA10	110
Tabela 46 – Combinações Raras CCA10	111
Tabela 47 – Perdas de protensão por atrito CCA20	112
Tabela 48 – Perdas por acomodação das ancoragens CCA20	112
Tabela 49 – Perdas por cravação consecutiva CCA20	113
Tabela 50 – Protensão final CCA20	113
Tabela 51 – Combinações permanentes CCA20	113
Tabela 52 – Combinações quase permanentes CCA20	114
Tabela 53 – Combinações frequentes CCA20	114
Tabela 54 – Combinações Raras CCA20	115
Tabela 55 – Perdas de protensão por atrito CBCA10	116
Tabela 56 – Perdas por acomodação das ancoragens CBCA10	116
Tabela 57 – Perdas por cravação consecutiva CBCA10	117
Tabela 58 – Protensão final CBCA10	117
Tabela 59 – Combinações permanentes CBCA10	117

Tabela 60 – Combinações quase permanentes CBCA10	118
Tabela 61 – Combinações frequentes CBCA10	118
Tabela 62 – Combinações Raras CBCA10	119
Tabela 63 – Perdas de protensão por atrito CBCA20	120
Tabela 64 – Perdas por acomodação das ancoragens CBCA20	120
Tabela 65 – Perdas por cravação consecutiva CBCA20	121
Tabela 66 – Protensão final CBCA20	121
Tabela 67 – Combinações permanentes CBCA20	121
Tabela 68 – Combinações quase permanentes CBCA20	122
Tabela 69 – Combinações frequentes CBCA20	122
Tabela 70 – Combinações Raras CBCA20	123

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ACV – Avaliação do ciclo de vida

AICV – Avaliação dos impactos no ciclo de vida

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CBCA – Cinza do bagaço de cana de açúcar

CUAD – CUAD

CV – Cinza Volante

EGAF – Escória granulada de alto forno

f_{ck} – Resistência característica do concreto

ICV – Inventário do ciclo de vida

MCS – Materiais cimentícios suplementares

nS – Nanossílica

PC –Pó de calcário

PQ – Pó de quartzo

PS – Pó de sílica

PV – Pó de vidro

SP – Superplastificante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PERGUNTA DA PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	18
1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	19
1.5 ESTRUTURA	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 CUAD	21
2.1.1 Materiais e propriedades	21
2.1.2 Métodos de dosagem	27
2.1.3 Métodos de mistura	30
2.1.4 Cura.....	31
2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	32
2.2.1 Objetivo e escopo.....	33
2.2.2 Inventário do Ciclo de Vida.....	34
2.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida.....	34
2.2.4 Interpretação	36
2.2.5 Avaliações do ciclo de vida de CUADs.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	41
3.2 DOSAGEM.....	42
3.2.1 CUAD	42
3.2.2 Concreto convencional	46
3.3 PROCEDIMENTOS DE MISTURA.....	46
3.4 CURA	46
3.4.1 Cura convencional submersa	46
3.4.2 Cura a Vapor	46
3.5 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	47
3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	47
3.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	49
3.8 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	49
3.9 DIMENSIONAMENTO DA VIGA PROTENDIDA.....	49
3.9.1 Projeto de viga	49
3.9.2 Carregamentos.....	53
3.10 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	55
3.10.1 Objetivo e escopo.....	55
3.10.2 Inventário do Ciclo de Viga (ICV)	57
3.10.3 Avaliação dos impactos no ciclo de vida (AICV)	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	63
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	64
4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	65
4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	66
4.5 DIMENSIONAMENTO DA VIGA EM CUAD	67
4.5.1 Cura convencional.....	67

4.5.2 Cura a vapor.....	69
4.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	70
4.6.2 Avaliação do ciclo de vida das vigas protendidas	78
4.6.3 Análise de sensibilidade da ACV realizada	86
5 CONCLUSÕES	91
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS.....	94
APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO DAS VIGAS PROTENDIDAS	101

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concretos com maiores resistências à compressão vem se tornando mais comum na construção civil. Os avanços da tecnologia permitiram que concretos com resistências superiores a 100 MPa começassem a ser comercializados e a utilização de concretos mais resistentes se tornou comum em países em desenvolvimento e desenvolvidos (WU; SOFI; MENDIS, 2010).

O concreto de ultra alto desempenho (CUAD) é reconhecido por altas resistência à compressão e durabilidade devido ao aumento da densificação da microestrutura pelo empacotamento de partículas. O CUAD também apresenta excelentes absorção de energia e ductilidade (GU; YE; SUN, 2015; NASR et al., 2020; SHI et al., 2015; ZHONG; WILLE; VIEGAS, 2018).

A alta resistência e o maior módulo de elasticidade do CUAD podem tornar possível a produção de estruturas mais leves, com menor consumo de materiais. Sendo assim, o material pode ser uma alternativa mais sustentável para a construção civil quando comparado com concreto convencional.

A construção civil é uma das indústrias que mais causam impactos ambientais no planeta, sendo uma das maiores responsáveis pela emissão de gases que causam o efeito estufa, com 19% das emissões e 32% do consumo de energia global (LUCON O. et al., 2014).

O cimento, principal material da construção civil, é o material manufaturado mais consumido no mundo e o segundo material mais utilizado, depois da água (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). Dos materiais mais utilizados na construção civil no Brasil, o Cimento *Portland* emite em torno de 650 kgCO₂/tonelada, o aço 1.845 kgCO₂/tonelada e a areia e a brita 85,8 kgCO₂/tonelada (DA COSTA, 2012).

Em 2016 a produção de cimento foi responsável pela emissão de 24,9% das emissões de gases que causam o efeito estufa no Brasil. O setor da metalurgia, que, entre outros materiais, produz o aço, utilizado em armaduras de estruturas de concreto, teve contribuição de 48,2% das emissões no mesmo período. A produção de cimento no Brasil emite anualmente 22,4 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera (BRASIL, 2020).

Para atingir as altas resistências e o empacotamento de partículas ideal, uma alta quantidade de cimento (entre 800 e 1000 kg/m³) é utilizada na produção do CUAD (SHI et al., 2015). A alta utilização de cimento no CUAD, portanto, levanta uma dúvida

no potencial sustentável do material. Os impactos ambientais causados pelo aumento no consumo de cimento são compensados pela potencial redução de consumo de concreto e aço nas estruturas?

Para entender a viabilidade da utilização do CUAD é necessário levantar os impactos ambientais gerados na produção dos materiais presentes no CUAD e nos processos de produção do concreto. Para isso, a avaliação do ciclo de vida (ACV) surge como ferramenta para o estudo dos impactos ambientais do CUAD, possibilitando estimar o potencial de impactos ambientais de produtos e processos produtivos (STENGEL; SCHIESSL, 2013)

Parte do cimento pode ser substituído por materiais cimentícios suplementares (MCS) como escória granulada de alto forno, pó de calcário, cinza volante, cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA) e cinza de casca de arroz (CCA) (RAJASEKAR et al., 2018; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015; ZHANG; ZHAO, 2017)

Desta forma, o presente trabalho se propôs realizar uma avaliação de impacto de ciclo de vida para determinar os impactos ambientais de CUADs. Para tal, foi dimensionada uma viga protendida de ponte em CUAD, baseada em um projeto original em concreto convencional. Considerando as alterações em consumo de concreto por redução de seções transversais e de aço de protensão e armadura à flexão, foi realizada uma avaliação do ciclo de vida para comparar os impactos do concreto convencional e do CUAD e averiguar possíveis vantagens e desvantagens da utilização do CUAD como material de construção sob o ponto de vista da sustentabilidade.

1.1 PERGUNTA DA PESQUISA

Considerando a possibilidade de reduções em seções transversais de estruturas ao adotar CAD e o alto consumo de materiais, especialmente cimento, a presente pesquisa se baseia na seguinte pergunta:

Quais os impactos ambientais da produção de vigas protendidas com CADs e da substituição de cimento por cinza da casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar quando comparados ao concreto convencional?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivos mensurar os impactos ambientais de CADs e avaliar se o aumento de consumo de cimento nos traços pode ser compensado pelas reduções de seções transversais e consumo de aço devido à mais alta resistência do material e pela substituição parcial do cimento por CCA e CBCA.

1.2.2 Objetivos específicos

A presente pesquisa teve como objetivos específicos:

- Produzir traços de CUAD com consumo de cimento reduzido, utilizando cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar;
- Dimensionar vigas protendidas em CUAD com base em um projeto existente de uma ponte, comparando os resultados de consumo de materiais.
- Realizar uma avaliação do ciclo de vida para comparação dos impactos ambientais de uma viga em CUAD e o projeto original considerado.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

De acordo com Zhong, Wille e Viegas (2018) justificável utilizar CUADs quando os impactos ambientais e fatores mecânicos são levados em consideração em seu ciclo de vida.

A alta resistência do CUAD permite reduções de cerca de 20% em vigas de concreto armado e 50% em pilares. Isso também significa que a utilização do CUAD pode resultar na redução de impactos ambientais de emissão de CO₂ em até 30% (DONG, 2018; RANDL et al., 2014).

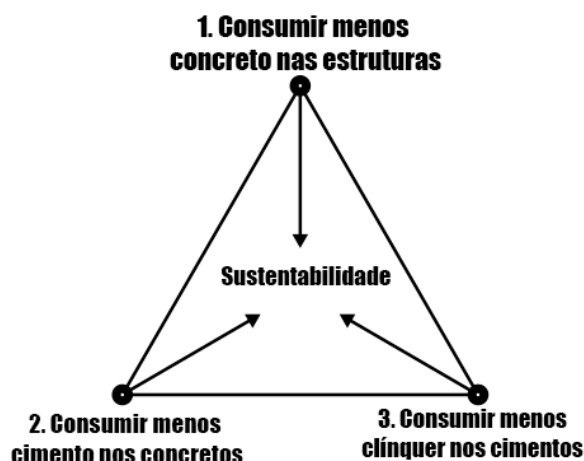
Apesar das vantagens do CUAD em relação à redução do consumo de concreto e à sua alta durabilidade, a alta utilização de cimento em sua produção é um empecilho para a aplicação do material de um ponto de vista sustentável.

Mehta (2009) sugere três passos (Figura 1) para aumentar a sustentabilidade na construção civil: a) consumir menos concreto, b) consumir menos cimento nos traços de concreto e c) consumir menos clínquer na produção do cimento.

Esses três passos também podem ser considerados para aumentar a sustentabilidade do CUAD como material de construção: a) a maior resistência torna

possível a redução de seções transversais e, portanto, o consumo de concreto; b) um processo de dosagem otimizado pode reduzir o consumo de cimento do CUAD por m³ sem reduções em suas propriedades mecânicas e c) materiais suplementares podem ser utilizados no CUAD e aumentar sua sustentabilidade.

Figura 1 – Três passos para a sustentabilidade na construção civil



Fonte: Adaptado de Mehta (2009)

Pela consideração dos impactos ambientais totais e de cada estágio da produção de materiais e pelo auxílio na tomada de decisões, a avaliação do ciclo de vida é uma das mais importantes ferramentas para o *eco-design* de materiais (ZBICIŃSKI et al., 2006).

1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Pela falta de modelos para a predição da vida útil de elementos em CUAD, a realização da avaliação do ciclo de vida é impossibilitada considerando os estágios do berço ao túmulo. Sendo assim, neste estudo foi realizada uma ACV considerando os estágios de extração de matéria prima e produção das vigas protendidas.

1.5 ESTRUTURA

O trabalho está estruturado em 5 capítulos: introdução, revisão teórica, materiais e métodos, resultados e conclusão.

- Capítulo 1: Introdução ao CUAD e contextualização sobre a utilização;
- Capítulo 2: Revisão teórica abordando materiais utilizados para a produção de CUADs, métodos para mistura e cura e aplicações do CUAD. A avaliação do

ciclo de vida também é abordada e estudos de ACV sobre o CUAD são apresentados;

- Capítulo 3: Apresentação dos materiais propostos para utilização na pesquisa, métodos de mistura e cura escolhidos e informações sobre a ACV a ser realizada;
- Capítulo 4: Resultados e discussão dos ensaios e da ACV realizados no estudo;
- Capítulo 5: Conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CUAD

2.1.1 Materiais e propriedades

Esta seção tem como objetivo identificar diferentes materiais e proporções utilizados na literatura para a produção de CUADs com boas características mecânicas e reológicas e com o objetivo de aumentar a sustentabilidade do material.

Yu, Spiesz e Brouwers (2015) desenvolveram um CUAD eco-amigável com a utilização de cinza volante, escória granulada de alto forno e pó de calcário como substituição de cimento para avaliar a influência de diferentes adições minerais nas propriedades do concreto. Entre todos os materiais testados, o pó de calcário demonstrou maior demanda de água e composições com escória granulada de alto forno obtiveram os melhores valores para resistência à compressão.

Várias pesquisas estão sendo feitas com o objetivo de aumentar a sustentabilidade de CUADs sem afetar negativamente suas propriedades. Randl et al. (2014) e Bahed e Jaafar (2018) verificam que escória granulada de alto forno e cinza volante são duas boas alternativas como substituição de cimento em porcentagens de até 50% com melhorias de desempenho mecânico do CUAD.

A utilização de escória granulada de alto forno afeta diretamente na trabalhabilidade. A substituição de cimento por escória em até 30% é capaz de reduzir a necessidade da utilização de superplastificantes em até 58% (ABDULKAREEM et al., 2018).

Kim, Koh e Pyo (2016) avaliaram as alterações nas propriedades mecânicas e reológicas de CUADs com alta porcentagem de substituição de cimento por pó de calcário. O pó de calcário tem distribuição granulométrica semelhante à do cimento e proporciona ao UHPC uma melhor trabalhabilidade. Entretanto, devido a efeitos químicos limitados, é utilizado no CUAD como filler e sua utilização em altas quantidades pode resultar em perda de resistência.

A viabilidade da utilização da cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA) como adição pozolânica também é averiguada. Para tornar possível a substituição de cimento por cinza do bagaço de cana de açúcar, é necessário que o material seja tratado em forno e queimado em temperatura controlada entre 450°C e 600°C, com taxa de aquecimento de 13°C por minuto. Pode ser utilizada em CUADs em

porcentagens de até 20% em peso sem redução de propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade (RAJASEKAR et al., 2018).

A cinza de casca de arroz (CCA) pode ser utilizada como adição mineral, em substituição à sílica ativa, ou como substituição parcial de cimento. Devido à sua estrutura de poros, altas porcentagens de cinza de casca de arroz prejudicam a trabalhabilidade do CUAD e aumenta a demanda da utilização de superplastificantes. A utilização em substituição à sílica ativa também pode reduzir a permeabilidade dos CUAD em proporções de até 2/3 em massa. Pode ser utilizada como substituição de cimento em até 20%, porém tem-se 10% como valor ideal para manutenção de propriedades mecânicas e reológicas (HUANG et al., 2017; VAN TUAN et al., 2011; ZHANG; ZHAO, 2017).

O pó de vidro, quando utilizado com um diâmetro máximo de 35 μm , apresenta atividade pozzolânica e pode ser uma boa opção para substituição de cimento na produção de CUADs mais sustentáveis. É possível utilizá-lo com substituição de cimento em até 20% sem efeitos negativos na resistência à compressão. Em porcentagens de até 50% a trabalhabilidade e sustentabilidade do CUAD são melhoradas, apesar de perda em resistência mecânica (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017a, 2017b).

A sílica ativa é um dos materiais mais usados na produção do CUAD. Devido à sua fina granulometria, o material é importante por efeitos físicos, preenchendo micro vazios na distribuição granulométrica do cimento em utilização entre 25% e 35% em peso de cimento, e também por efeitos pozzolânicos (SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017a; VAN TUAN et al., 2011).

Embora seja sabido que a sílica ativa pode ser utilizada em porcentagens de até 25% em peso de cimento sem afetar negativamente as propriedades mecânicas e reológicas do CUAD (ALKAYSI; EL-TAWIL, 2016), adições entre 15% e 20% em peso de cimento são indicadas para melhores resultados de resistência à compressão (ALKAYSI; EL-TAWIL, 2016; MOSABERPANAH; EREN, 2018).

Ao comparar os resultados dos estudos de (Alkaysi e El-tawil (2016); Mosaberpanah e Eren, (2018). com os descritos previamente por Soliman, Tagnit-Hamou e (2017a) e Van Tuan et al. (2011), percebe-se que não há consenso sobre a porcentagem ideal da utilização da Sílica Ativa no CUAD. Embora, teoricamente, os micro vazios do cimento sejam preenchidos em porcentagens de adição de 25% a 30% em peso de

cimento, resultados de ensaios de resistência à compressão indicam maiores ganhos de resistência em porcentagens de até 20% em peso de cimento.

A sílica ativa possui alta energia superficial, o que aumenta a aglomeração no concreto e reduz a trabalhabilidade quando utilizadas em altas porcentagens (GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015).

Mazanec et al. (2010) explica que, devido à sua fina granulometria, o aumento da quantidade de sílica ativa no CUAD pode reduzir o tempo de mistura necessário. A sílica ativa preenche vazios entre cimento, pó de quartzo e partículas de água, aumentando a separação entre cimento e pó de quartzo e reduzindo a fricção entre partículas dos materiais. No estudo foram testadas porcentagens de adição de sílica ativa em peso de cimento entre 10 a 30% e em todos os casos a adição de sílica ativa se mostrou benéfica para o tempo de estabilização da mistura, sendo 27% a adição de sílica ativa com menor tempo de estabilização observado.

Adicionalmente, de um ponto de vista sustentável, a sílica ativa aumenta a eficiência de material do CUAD em até 64% devido à melhora na resistência à compressão do CUAD e aos baixos impactos ambientais gerados em sua produção (ZHONG; WILLE; VIEGAS, 2018). A eficiência de material, neste caso, foi um coeficiente adimensional em função da resistência à compressão do concreto, sua trabalhabilidade, o custo unitário para a produção do concreto e o potencial de aquecimento global, conforme Equação 1.

$$E = \frac{0.7 \times \frac{f'_c}{f'_{c0}} + 0.3 \times \frac{r}{r_0}}{\left(\frac{\omega/\omega_0}{\eta}\right) \left(\frac{GWP/GWP_0}{\eta}\right)} \quad (1)$$

Onde,

f'_c : Resistência à compressão do CUAD;

f'_{c0} : Resistência à compressão do concreto convencional;

r : Espalhamento do CUAD;

r_0 : Espalhamento do concreto convencional;

ω : Custo unitário do CUAD;

ω_0 : Custo unitário dos coprodutos;

η : Fator de durabilidade;

GWP: Potencial de aquecimento global do CUAD;

GWP0: Potencial de aquecimento global do concreto convencional.

Nanomateriais também são opções para melhorar a microestrutura do CUAD. Nanomateriais também podem ser utilizados na produção do CUAD, como nanotubos de carbono, nanossílica e nano pó de calcário. Camiletti, Soliman e Nehdi (2013) investigaram os efeitos da incorporação de nano- CaCO_3 como substituição parcial de cimento sozinha ou combinada com micro pó de calcário e suas propriedades na primeira idade do CUAD foram avaliadas. A substituição cimento por micro e/ou nano CaCO_3 possibilitou melhorias na trabalhabilidade do CUAD comparado à mistura de referência. Em relação à resistência mecânica aos 28 dias, a substituição por 5% de cimento por nano- CaCO_3 proporcionou um concreto 20% mais resistente que o traço de referência.

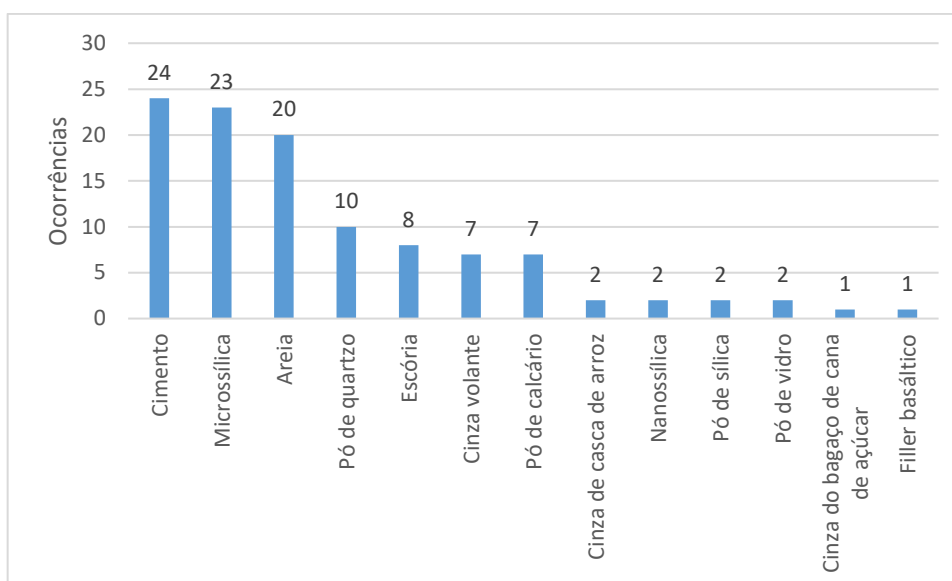
Os efeitos da nanossílica (nS) no desempenho mecânico de CUADs foram avaliados por Mendes, Repette e Reis (2017) considerando a substituição parcial de cimento por nS e o emprego, também, de sílica ativa. A adição de nanossílica em 0,6% em peso de cimento e com a combinação da adição de 10% de sílica ativa, também em peso de cimento, proporcionou os melhores resultados para resistência a compressão do CUAD. Para valores de nS superiores a 2,5% a resistência à compressão é alterada negativamente.

A adição de nanotubos de carbono de paredes múltiplas dispersos em cimento em proporções foi testada em CUADs tem proporções de adição de 0,05 e 0,1% em peso de cimento. Apesar de não apresentar ganhos de resistência, nanotubos de carbono podem melhorar o desempenho de CUADs sob altas temperaturas e a resistência à ocorrência do deslocamento (*spalling*) explosivo (VIANA et al., 2020).

Pela baixa relação água/cimento, geralmente de até 0,3, e o alto teor de materiais muito finos, que aumentam a demanda de água da mistura de CUADs, o ajuste da trabalhabilidade do concreto é feito pelo uso de aditivos superplastificantes à base de policarboxilato em altas quantidades, as vezes em dosagens acima da recomendação do fabricante para concreto convencional. A adição mais comum é feita em 2% em peso de cimento (ABDULKAREEM et al., 2018; PREM; BHARATKUMAR; IYER, 2013; SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017a; VIANA et al., 2018; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014; ZHONG; WILLE; VIEGAS, 2018), podendo haver a utilização de 4% (RAJASEKAR et al., 2018; RANDL et al., 2014) e até 7% (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015).

Com a análise dos artigos presentes na revisão bibliográfica foi possível fazer o levantamento dos materiais mais utilizados na produção do CUAD. Cimento, areia, sílica ativa e pó de quartzo são os quatro materiais mais utilizados na composição e cinza volante, escória granulada de alto forno e pó de calcário as substituições de cimento mais frequentes. A Figura 3 apresenta os materiais utilizados e o número de aparições em 24 artigos presentes na revisão teórica.

Figura 2 – Materiais aglomerantes e agregados utilizados nos artigos citados na revisão bibliográfica



Fonte: Elaborado pelo Autor

Diferentes materiais podem ser utilizados para a produção CUADs e as variações desses materiais afetam as propriedades mecânicas do concreto. Em resumo, a Tabela 1 contém as composições de CUADs disponibilizadas na literatura com os melhores resultados de resistência à compressão obtidos.

Também é importante ressaltar que, embora haja na literatura uma definição um f_{ck} de 150 MPa como mínimo para o desenvolvimento do CUAD, na Tabela 1 é possível observar que vários estudos têm sido feitos com resistências inferiores às citadas. Pode ser considerado, então, que outras propriedades, como resistência ao fogo (ABID et al., 2017; VIANA et al., 2020), ao gelo ((ALKAYSI et al., 2016) e sua maior durabilidade (GU et al., 2016; RAJASEKAR et al., 2018) também são parâmetros para a classificação de um concreto como CUAD.

Tabela 1 – Materiais empregados na produção de CUADs e as respectivas resistências à compressão obtidas nos artigos da revisão teórica

Artigo	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Sílica ativa (kg/m ³)	Nanossílica (kg/m ³)	PQ (kg/m ³)	EGAF (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	PC (kg/m ³)	SP	a/c	Resistência (MPa)
(YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015)	883,9	1091,2	227,3	25,5	-	-	-	-	5%	0,180	130
(RANDL et al., 2014)	729	833	124	-	397	-	-	-	4%	0,234	166,1
(ARORA et al., 2019)	946	860	71	-	-	-	166	47	1,25%	0,175	140
(HABERT et al., 2013)	763	-	153	-	-	-	-	763	3,6%	0,294	-
(ZHONG; WILLE; VIEGAS, 2018)	1327,8	-	332	-	332	-	-	-	2,1%	0,210	-
(YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014)	874,9	1273,4	43,7	-	-	-	-	-	5%	0,231	100
(ABDULKAREEM et al., 2018)	683,9	1075	183	-	61	268,1	-	-	0,75%	0,235	130
(MENG; VALIPOUR; KHAYAT, 2017)	548	211	42	-	-	535	-	-	2,5%	0,254	170
(YU et al., 2017)	883,9	1091,2	227,3	-	-	-	-	-	5,1%	0,186	118
(SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2016)	807	972	225	-	243	-	-	-	1,6%	0,242	170
(ZHANG; ZHAO, 2017)	875	1273	44	-	-	-	-	-	0,8%	0,231	115
(VIANA et al., 2018)	935	935	234	-	-	140	-	-	2%	0,210	160

PQ – Pó de Quartzos, EGAF – Escória Granulada de Alto Forno, CV – Cinza Volante, PC – Pó de Calcário, SP - Superplastificante

Fonte: Elaborado pelo Autor

2.1.2 Métodos de dosagem

Assim como a utilização de materiais, o processo de dosagem do CUAD não é bem definido na literatura. Diferentes métodos são propostos e estudados visando a otimização das misturas por métodos estatísticos, o aumento da eficiência dos materiais, a redução dos impactos ambientais e a obtenção de um máximo empacotamento de partículas na mistura do CUAD.

Hüsken (2010) propôs um método, utilizando o modelo de Andreasen e Andersen modificado (FUNK; DINGER, 1994) para a otimização do traço de concretos. Neste modelo, a curva de empacotamento de partículas é definida como uma regressão linear e o traço do concreto é realizado escolhendo a distribuição de materiais com melhor ajuste a essa curva. Isso é feito utilizando o coeficiente de determinação (R^2), uma ferramenta estatística, com valores possíveis de 0 a 1, que define o grau de ajuste de uma regressão à distribuição de pontos (MONTGOMERY; RUNGER, 2014). O método é utilizado em estudos que têm o objetivo de otimizar a estrutura granular dos CUADs e reduzir o consumo de cimento das composições (CHEN et al., 2018; YU et al., 2017; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014, 2015)

Modelos estatísticos para a dosagem e otimização de composições de CUADs são comuns na literatura. Mosaberpanah e Eren (2018) realizaram método estatístico de experimentos fatoriais considerando como variáveis cimento, sílica ativa, teor de fibras, superplastificante e relação água/cimento, com o objetivo de produzir um CUAD com boa resistência sem altas emissões de CO_2 . Foram produzidas 35 diferentes composições e, com os valores de resistência e emissões de CO_2 , foram realizadas regressões quadráticas para a obtenção do traço ideal, melhor relação resistência à compressão x emissões de CO_2 . Os resultados indicaram que é possível produzir CUADs com baixas emissões sem perda de resistência, porém nenhuma das composições produzidas no estudo atingiu o mínimo de 150 MPa.

Ghafari, Costa e Júlio (2015) utilizaram uma abordagem estatística para a dosagem de CUADs. Foram realizadas 53 diferentes composições de CUAD variando as quantidades de materiais do concreto. Um modelo preditivo para a resistência à compressão e os valores de *slump flow* (tempo de escoamento) foi construído e as respostas foram comparadas aos dados experimentais para validação. Com o modelo obtido foi possível produzir CUAD com resistências superiores a 150 MPa e consumo de cimento abaixo de 700 kg/m³.

Outros métodos, sem envolvimento de teorias de empacotamento ou métodos estatísticos, são propostos na literatura. Com o objetivo de otimizar o traço para a produção de um CUAD, foi proposto por Meng, Valipour, Khayat (2017) uma dosagem em seis passos principais:

- I. Determinar os candidatos ao cimento a ser utilizado;
- II. Escolher uma relação água/cimento ideal preliminar para a pasta;
- III. Determinar a combinação de areias diferentes pelo melhor ajuste ao empacotamento de partículas;
- IV. Determinar a razão areia/cimento;
- V. Otimizar o teor de fibras;
- VI. Avaliar e ajustar as misturas de CUAD.

Com o método proposto foi possível produzir CUADs auto adensáveis e estáveis, com resistências aos 28 dias entre 120 MPa e 178 MPa.

Além de um empacotamento ideal da estrutura granular da composição, o método de cura também pode afetar diretamente nas características mecânicas do CUAD (YU et al., 2017).

2.1.2.1 Modelos de empacotamento de partículas

Originalmente, Andreasen (1930) propôs um modelo conhecido como modelo de empacotamento de partículas de Andreasen e Andersen para a distribuição de partículas em uma mistura:

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{m\acute{a}x}} \right)^q \quad (2)$$

Sendo,

D: Diâmetro da partícula

$D_{m\acute{a}x}$: Diâmetro máximo da partícula do material

q: proporção entre partículas finas e grossas da mistura

Entretanto, como o modelo de Andreasen e Andersen não inclui o diâmetro mínimo, Funk e Dinger (1994) sugeriram o modelo modificado de Andreasen e Andersen, incluindo o valor de diâmetro mínimo na Equação 3. Na Figura 3 é possível ver a comparação entre os modelos de empacotamento de partículas de Andreasen e Andersen e Andreasen e Andersen modificado.

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (3)$$

Onde,

D: Diâmetro da partícula

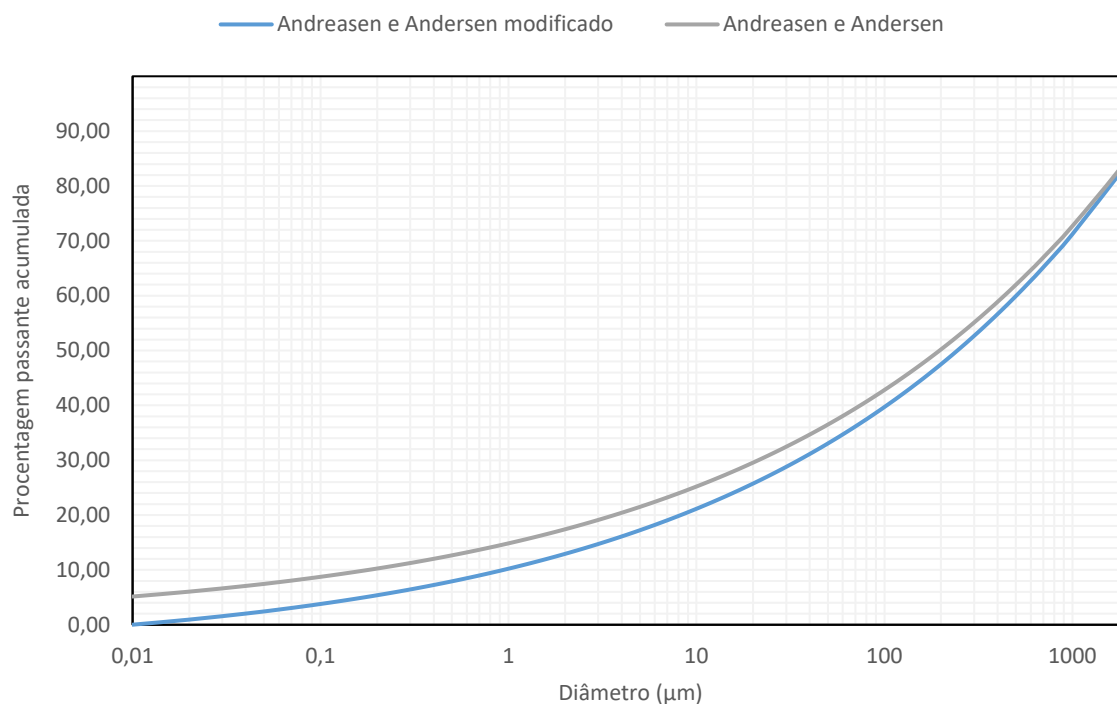
$D_{\max}$: Diâmetro máximo da partícula do material

$D_{\min}$: Diâmetro mínimo da partícula do material

q: proporção entre partículas finas e grossas da mistura

Os valores de q das equações de empacotamento de partículas podem variar entre 0,21 e 0,37, dependendo das exigências de trabalhabilidade sendo que, o quão menor o valor do coeficiente, mais partículas finas estarão presentes (KUMAR; SANTHANAM, 2003). No geral, o quanto maior a quantidade de pós em concretos, menor o valor de q que representa o melhor ajuste de distribuição das partículas (BROUWERS; RADIX, 2005).

Figura 3 – Comparação entre os modelos de Andreasen & Andersen e Andreasen & Andersen modificado



Fonte: Elaborado pelo Autor

2.1.3 Métodos de mistura

CUADs possuem alto volume de finos em suas composições, podendo chegar a 45% do peso. As partículas finas tendem a aglomerar devido às suas forças intermoleculares, podendo afetar as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido (ZHONG; WILLE; VIEGAS, 2018). O processo de mistura, portanto, também é fator essencial para o desenvolvimento dos CUADs.

A velocidade dos aparelhos de mistura do CUAD pode influenciar no tempo de estabilização do concreto. A utilização de aparelhos com maior velocidade de rotação reduz o tempo da mistura do CUAD. Um equipamento com velocidade da pá de 2,9 m/s tem um tempo de estabilização 11% menos que uma velocidade de 1,4 m/s (MAZANEC et al., 2010).

O tempo de mistura é um dos parâmetros básicos para a produção de um CUAD estável e com trabalhabilidade. É importante definir bem o tempo para a mistura do CUAD para consumir o mínimo possível de energia na mistura sem a ocorrência de alterações na trabalhabilidade do material (ABDULKAREEM et al., 2018).

Rajasekar et al. (2018) misturaram todos os materiais “secos” do CUAD (cimento, sílica ativa, pó de quartzo e areia) por 2 minutos em velocidade de 200 rpm. Ao final do período, 70% da água foi adicionada e misturada na mesma velocidade. Por último, o restante da água com todo o plastificante foi adicionado a uma taxa constante e a mistura seguiu por 20 minutos em velocidade de 450 rpm.

Alkaysi e El-Tawil (2016) realizaram o método de mistura colocando areia, cimento e sílica ativa em mistura seca por 5 minutos a 136 rpm. Após isso, toda a água e o superplastificante foram adicionados gradativamente e a mistura continuou a 136 rpm por mais dois minutos. Após este período, a velocidade foi aumentada para 281 rpm por 5 minutos, ou até que o concreto atingisse uma trabalhabilidade aceitável.

Kim, Koh e Pyo (2016) adicionaram sílica ativa e areia por 5 minutos. Após o período, adicionou pó de quartzo e cimento e a mistura continuou por mais 5 minutos, então água e superplastificante foram adicionados gradativamente. A mistura ficou fluida 3 minutos após a adição de água e SP.

Arora et al. (2019) misturaram os agregados com uma quantidade pré-determinada de água e adicionou os pós na mistura em ordem de finura, respeitando um intervalo de 3 a 4 minutos entre cada adição: sílica ativa, seguida por pó de calcário, cimento e cinza volante, visando evitar a aglomeração dos materiais. Água e superplastificante

foram adicionados em três etapas, havendo um intervalo de 5 minutos entre cada etapa.

Zhong, Wille e Viegas (2018) afirmam que uma adição de superplastificante em etapas pode melhorar a trabalhabilidade dos CUADs. Em sua mistura, primeiramente sílica ativa foi adicionada e misturada. Após 5 minutos foram adicionados cimento e materiais suplementares, que ficaram na mistura por mais 5 minutos. Por último, água foi adicionada com um terço do superplastificante e o restante foi acrescentado à mistura.

O método indicado por Khaloo (2017) foi utilizado por Queiroz (2018) e Viana (2019). Primeiramente, sílica ativa e agregados (areia, pó de quartzo e escória granulada de alto forno) foram adicionados e misturados com água e superplastificante em velocidade baixa por 3 minutos. Após esse período, cimento foi adicionado em duas etapas de 30 segundos, com 30 segundos de intervalo.

Analisando diferentes métodos obtidos na literatura, é possível identificar que a mistura seca dos materiais e adição gradual de superplastificante e água são essenciais para o desenvolvimento de CUADs com boa trabalhabilidade.

2.1.4 Cura

Além do empacotamento de partículas ideal dos materiais, um método de cura é essencial para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do CUAD. A baixa quantidade de água no CUAD é consumida nos processos de hidratação do cimento, portanto é necessário prestar atenção no método de cura para evitar que a água seja perdida no processo de cura (GRAYBEAL, 2011; YU et al., 2017).

Os três métodos mais populares usados para a produção de CUADs são a cura convencional em temperatura ambiente, cura térmica e cura a vapor. Como CUADs têm uma baixa taxa de hidratação, para melhorar as propriedades mecânicas do concreto é necessário ativar as reações e regimes térmicos de cura são considerados as melhores alternativas (PREM; BHARATKUMAR; IYER, 2013).

Na cura térmica os corpos de prova são levados em forno por até 7 dias em diferentes temperaturas. Corpos de prova submetidos a temperaturas em torno de 200°C apresentam melhores propriedades mecânicas. Também é recomendado que após a cura térmica os corpos de prova sejam submetidos à cura submersa até a idade de 28 dias (HIREMATH; YARAGAL, 2017; JUSTS; SHAKHMENKO; BAJARE, 2010; RAJASEKAR et al., 2018).

Outro possível método para a produção de CUADs é a cura com o uso de autoclave. O período de submissão dos corpos de prova em cura em autoclave é um fator que interfere no resultado final de resistência à compressão de CUADs. Corpos de prova submetidos por até 10 horas apresentam melhores resultados de resistência à compressão e à flexão (BAHEDH; JAAFAR, 2018; ZHANG et al., 2019). Em períodos superiores a 10 horas é observada a queda da resistência à compressão (CHEN; GAO; REN, 2018). A pressão utilizada na cura em autoclave também afeta as propriedades mecânicas do CUAD. Melhores resultados são obtidos com pressões em torno de 1,0 MPa (BAHEDH; JAAFAR, 2018; CHEN; GAO; REN, 2018; ZHANG et al., 2019).

A cura a vapor também é uma alternativa para o desenvolvimento de CUADs. Vinte e quatro (24) horas após a desmoldagem, corpos de prova de concreto são inseridos em câmaras de vapor em pressão atmosférica e permanecem em períodos de até 48 horas em temperaturas de até 90°C (HIREMATH; YARAGAL, 2016; SOLIMAN; TAGNIT-HAMOU, 2017a; VIGNESHWARI; ARUNACHALAM; ANGAYARKANNI, 2018).

Queiroz (2018) e Viana et al. (2020) utilizaram o método estudado por Justs, Shakhmenko e Bajare (2010). Corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e levados à cura submersa. Após 24 horas os corpos de prova foram levados ao forno para cura térmica por 24 horas. Ao final da cura térmica os corpos de prova foram guardados em local seco e arejado. Foi observado um aumento de resistência entre 18% e 23% em relação a corpos de prova submetidos à cura submersa.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

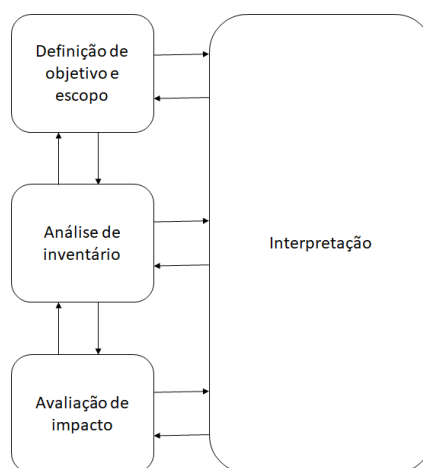
A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta utilizada para a análise de impactos ambientais de um produto ou sistema que considera todos os aspectos de uso de recursos e emissões no meio ambiente. A análise da contribuição dos estágios de produção nos impactos totais do sistema considerado na ACV e a comparação entre produtos são importantes aplicações da ferramenta para a ajuda na tomada de decisões em indústrias (JØRGENSEN; FATH, 2008; KRISHNA; MANICKAM, 2017; THE INTERNATIONAL STANDARDS ORGANISATION (ISO), 2006).

A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta que pode ajudar a responder se um produto é ambientalmente amigável e a decidir, comparando dois ou mais produtos, qual é mais sustentável (ZBICIŃSKI et al., 2006).

Uma ACV é dividida em 4 etapas:

- Definição de objetivo e escopo;
- Análise do inventário do ciclo de vida (ICV);
- Avaliação dos impactos no ciclo de vida (AICV);
- Interpretação

Figura 4 – Etapas de uma ACV



Fonte: Adaptado de ABNT (2014)

2.2.1 Objetivo e escopo

Na definição de objetivo e escopo é feito o planejamento do estudo. É a etapa que explica os motivos da realização do estudo, quais informações ele deseja obter e quais os objetivos definidos para a ACV, quem é o público alvo do estudo, quais as limitações e as fronteiras do sistema, quais categorias de impacto serão colocadas e outras informações relevantes e esclarecedoras para um amplo entendimento do que será a ACV realizada (ISO, 2006; MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002).

Matthews, Hendrickson and Matthews (2014) define que o objetivo da avaliação do ciclo de vida é ter declarações sem ambiguidade sobre quatro itens:

- A aplicação pretendida;
- Justificativas para a realização do estudo;
- Público alvo;
- Se os resultados serão usados em comparações disponíveis ao público.

Matthews, Hendrickson and Matthews (2014) também apontam que as declarações podem ser resumidas em duas perguntas:

- Quem pode se interessar pelo estudo realizado?
- Por que o estudo foi realizado e como foi realizado?

2.2.2 Inventário do Ciclo de Vida

A análise do inventário do ciclo de vida consiste num levantamento de entradas e saídas em processos e produtos dentro da fronteira delimitada do sistema, ponderando os resultados pela unidade funcional adotada (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002). É necessário lembrar que o processo de realização da ACV é iterativo e, quando vai se conhecendo melhor o processo estudado, novos detalhes podem ser observados e as mudanças nos procedimentos, na coleta de dados ou nas premissas adotadas na etapa de definição de objetivo e escopo podem ser necessárias (ISO, 2006).

2.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida

Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a etapa na qual os resultados do ICV são avaliados e os impactos ambientais são classificados em diferentes categorias (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002).

Categorias de impacto são diferentes áreas de interesse para classificar impactos ambientais em uma unidade funcional. A seleção das categorias de impacto depende dos objetivos e escopo da ACV, além da aplicação do estudo (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014; STRANDDORF et al., 2005).

Diferentes metodologias podem ser aplicadas numa ACV, dependendo de premissas adotadas e do objetivo final do estudo (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014). A Tabela 2 inclui algumas metodologias disponíveis para a execução de uma ACV e suas categorias de impacto.

Tabela 2 – Metodologias AICV e suas categorias de impacto

Metodologia	Acidificação	Aquecimento global	Depleção de recursos	Ecotoxicidade	Uso de energia	Eutrofização	Toxicidade humana	Radiação ionizante	Uso de solo	Odor	Depleção da camada de ozônio	Materiais particulados	Oxidação fotoquímica
CML (baseline)	X	X	X	X		X	X				X		X
CML (non baseline)	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X
Cumulative Energy Demand					X								
eco-indicator 99 (E)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	
eco-indicator 99 (H)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	
eco-indicator 99 (I)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	
Eco-Scarcity 2006			X										
ILCD 2011, endpoint	X	X				X	X	X	X		X	X	X
ILCD 2011, midpoint	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
ReCiPe Endpoint (E)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
ReCiPe Endpoint (H)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
ReCiPe Endpoint (I)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
ReCiPe Midpoint (E)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
ReCiPe Midpoint (H)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
ReCiPe Midpoint (I)	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
TRACI 2.1	X	X	X	X		X	X				X	X	X
USEtox				X			X						

Font: Adaptado from (ACERO; RODRIGUEZ; CIROTH, 2015)

Três perspectivas podem ser adotadas considerando diferentes intervalos de tempo: individualista (I), hierarquista (H) e igualitário (E). Essas perspectivas são descritas por Matthews, Hendrickson ad Matthews (2014) como:

- Individualista: Interesses a curto prazo. Modelo otimista que considera que a tecnologia possa evitar problemas no futuro;
- Hierarquista: Modelo padrão.
- Igualitário: Interesses a longo prazo. Modelo pessimista que leva em conta impacto que podem ser considerados, mas que não estão completamente estabelecidos.

Metodologias AICV também podem ter abordagens voltada ao problema (*midpoint*) ou voltada ao dano (*endpoint*). Bare et al (2000) explicam que um indicador *midpoint*

é um parâmetro numa cadeia de causa e efeito de emissões para uma categoria de impacto. Um indicador *endpoint* considera o efeito final da emissão e o dano em relação a uma área de proteção (BARE et al., 2000; CRESPO MENDES et al., 2013).

Uma típica AICV considera categorias de impacto como: potencial de aquecimento global, acidificação, toxicidade humana, depleção de recursos naturais, entre outros (DONG, 2018).

2.2.4 Interpretação

Na etapa de interpretação são avaliados os principais aspectos relacionados ao objeto de estudo da ACV realizada, os coloca em perspectiva e indica possíveis ajustes para mitigar os impactos ambientais. As entradas e saídas que mais contribuem para categorias de impacto e as categorias de impacto mais importantes são identificadas (ABNT, 2014; MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014; MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002).

Para testar a confiabilidade dos resultados obtidos na ACV é preciso realizar uma análise de sensibilidade, que consiste em averiguar o efeito causado nas respostas da ACV a partir de pequenas mudanças em premissas e valores de entrada utilizados no levantamento do inventário de ciclo de vida (JRC, 2010; MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014).

2.2.5 Avaliações do ciclo de vida de CUADs

Embora seja possível encontrar na literatura estudos com abordagens sustentáveis do CUAD, com consumo reduzido de cimento e aplicação de materiais com baixos impactos ambientais, poucos estudos foram feitos sobre os impactos ambientais do CUAD e sua viabilidade como material de construção de um ponto de vista sustentável.

Randl et al. (2014) comparou os impactos ambientais entre CUADs e concretos convencionais. Traços de referência (UM-5) e com substituição de 45% de cimento por escória granulada de alto-forno (M-5-GBSef) foram desenvolvidos. Para a consideração da vida útil do CUAD foi aplicado um fator de 2 em relação ao concreto convencional.

As categorias de impacto ambiental adotadas no estudo foram:

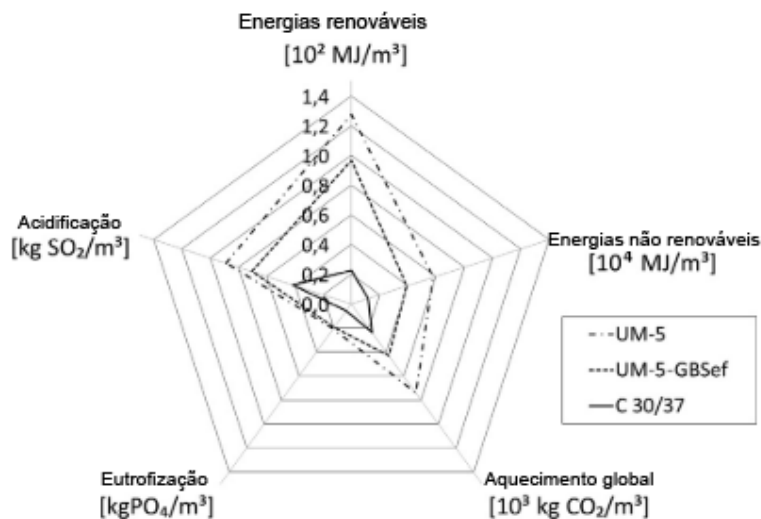
- Potencial de aquecimento global;
- Eutrofização;

- Consumo de energia renovável;
- Consumo de energia não renovável;
- Acidificação.

Considerando apenas 1 m³ de concreto, o concreto convencional tem menores valores de emissão em todas as categorias, porém a redução do consumo de cimento possibilitou a diminuição de emissões em todas as categorias de impacto, sendo o potencial de aquecimento global a categoria com melhores resultados (42% de redução). Os resultados são apresentados na Figura 5 .

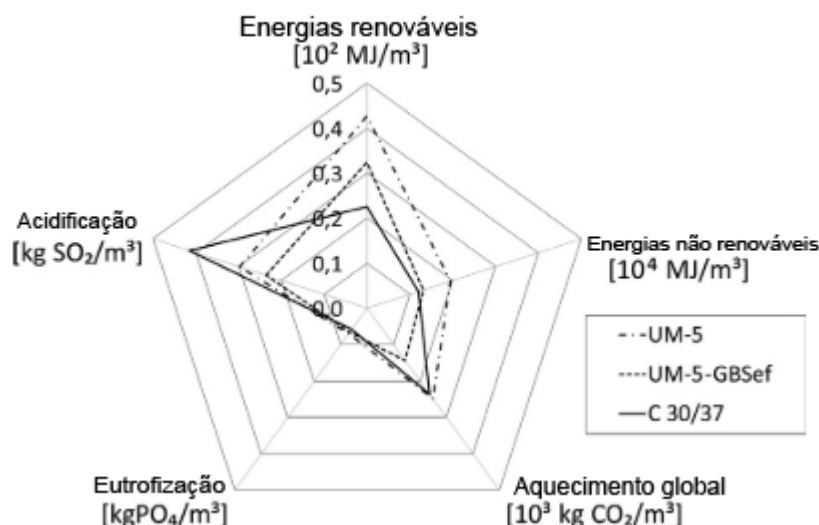
Contando com as reduções de consumo de concreto na utilização de elementos estruturais em CUAD, podendo ser de 10 a 20% em vigas e tabuleiros e entre 30 a 50% em pilares, por m³, foi possível ter o mesmo nível de potencial de aquecimento global entre o CUAD sem substituição de cimento e o concreto convencional. Ou seja, as emissões totais foram menores na estrutura de ultra alta desempenho. Os resultados podem ser observados na Figura 6.

Figura 5 – Comparação de categorias de impacto entre CUAD e concreto convencional



Fonte: Randl et al. (2014)

Figura 6 – Comparação de categorias de impacto considerando redução do consumo de concreto

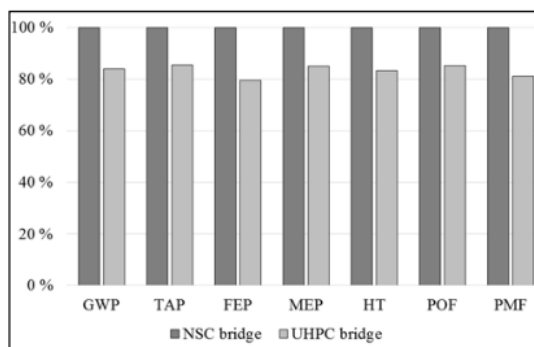


Fonte: Randl et al. (2014)

Kim, Koh e Pyo (2016) realizaram a avaliação do ciclo de vida em CUADs para observar vantagens de substituição de cimento por altos níveis de escórias industriais. Foram comparados uma mistura de referência, CUAD com substituição de 50% de cimento por escória de alto forno e CUAD com substituição de 50% de cimento por uma mistura binária de 35% de escória de alto forno e 15% de pó de calcário. Avaliando as categorias de impacto: consumo de energia renovável, consumo de energia não renovável, potencial de aquecimento global, acidificação e eutrofização, as emissões foram reduzidas em 31%, 35%, 46%, 7% e 22%, respectivamente, para o CUAD com 50% de escória. Para o CUAD com substituição binária de escória e pó de calcário, a redução nas emissões em todas as categorias de impacto foi de 34%, 37%, 42%, 7% e 25%.

Larsen et al. (2017) comparou os impactos ambientais de uma ponte produzida com concreto convencional e uma ponte produzida com CUAD. Uma ponte com viga T e 20 metros de vão livre foi utilizada. O estudo quantificou os impactos ambientais para potencial de aquecimento global, potencial de acidificação terrestre, potencial de eutrofização, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos e formação de material particulado. Foi considerada uma vida útil de 200 anos. No geral, os impactos ambientais da viga produzida com CUAD foram entre 14% e 21% menores que uma viga em concreto convencional, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Comparação dos impactos ambientais entre ponte em concreto convencional e ponte em CUAD



Fonte: Larsen et al. (2017)

O estudo de Sameer et al. (2019) investigou as emissões de CO₂, consumo de material e consumo de água de CUADs, comparado-o com concretos convencionais. Uma viga com dois vãos livres de 22,5 m e 21,5 m foi usada. Comparações foram feitas: (a) considerando a produção de 1 m³ de concreto convencional e UHPC e (b) a comparação entre a produção da ponte em concreto convencional e uma ponte mista em concreto convencional e cinco pilares de CUAD. Para a comparação de 1 m³, os impactos ambientais causados pelo CUAD são maiores que o concreto convencional. Entretanto, considerando a produção de pontes, a adoção do CUAD reduziu o potencial de aquecimento global em 16%, o consumo de material em 29% e o consumo de água em 30%.

A viabilidade da utilização de CUADs como materiais de construção para pontes também foi investigada por Dong (2018). Comparando o dimensionamento de uma ponte em concreto convencional e em CUAD, para uma vida útil de 75 anos, foi realizada a ACV para estimar o potencial de aquecimento global das duas pontes. A utilização do CUAD possibilitou a redução de 48% do volume de concreto, 39% da quantidade de aço para armaduras e 44% de aço para proteção. Como resultado da economia de materiais, as emissões de CO₂ da ponte calculada em CUAD foram 32,5% menores em relação à ponte em concreto convencional.

A partir da revisão bibliográfica sobre avaliações de ciclo de vida em CUADs é possível observar a importância da consideração das alterações nas seções transversais das estruturas para a avaliação do ciclo de vida. Conclusões sobre resultados de ACV realizada por m³ de CUAD, com os impactos do alto consumo de cimento na sua produção, podem ser opostas às de uma ACV realizada considerando

as reduções de consumo de material possibilitadas pela alta resistência do CUAD na produção de elementos estruturais, que podem, potencialmente, resultar em menores impactos ambientais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da pesquisa foi necessário desenvolver diferentes trabalhos experimentais e teóricos. As diferentes atividades da pesquisa foram divididas em três etapas:

1. Experimental: definição de traços de CUAD, produção de corpos de prova e realização de ensaios mecânicos de resistência à compressão, resistência à tração por flexão e módulo de elasticidade;
2. Dimensionamento: dimensionamento de vigas protendidas em CUAD para obtenção dos consumos de concreto e aço para protensão e flexão;
3. Avaliação do ciclo de vida: Levantamento dos inventários de ciclo de vida e realização da avaliação dos impactos no ciclo de vida com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção do CUAD foram definidos de acordo com estudos prévios de Queiroz (2018) e Viana (2019) e a disponibilidade dos materiais no CEFET-MG, Campus II. Os materiais utilizados para a produção do CUAD e seu local de origem são:

- Cimento CPV ARI (Lafarge-Holcim): Pedro Leopoldo/MG;
- Sílica ativa: Santos Dumont/MG;
- Areia fina: Belo Horizonte/MG;
- Pó de quartzo: Belo Horizonte/MG
- Aditivo supeprlastificante a base de policarboxilato: Itatiba/SP;
- Cinza da casca de arroz: Alegrete/RS;
- Cinza do bagaço da cana de açúcar: Bambuí/MG.

Para a produção do concreto convencional foram considerados:

- Cimento CPV ARI (Lafarge-Holcim): Pedro Leopoldo/MG;
- Areia fina: Belo Horizonte/MG;
- Brita: Belo Horizonte/MG.

A densidade dos materiais foi medida por picnometria por Hélio e a distribuição granulométrica de cimento e sílica ativa foi feita por difração de laser. Areia fina e pó de quartzo tiveram frações menores que 500 μm também medidas por difração de laser, mas para partículas com diâmetro superior foi utilizada a série de peneiras

granulométricas e agitador mecânico, de acordo com a ABNT NBR 7217 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987).

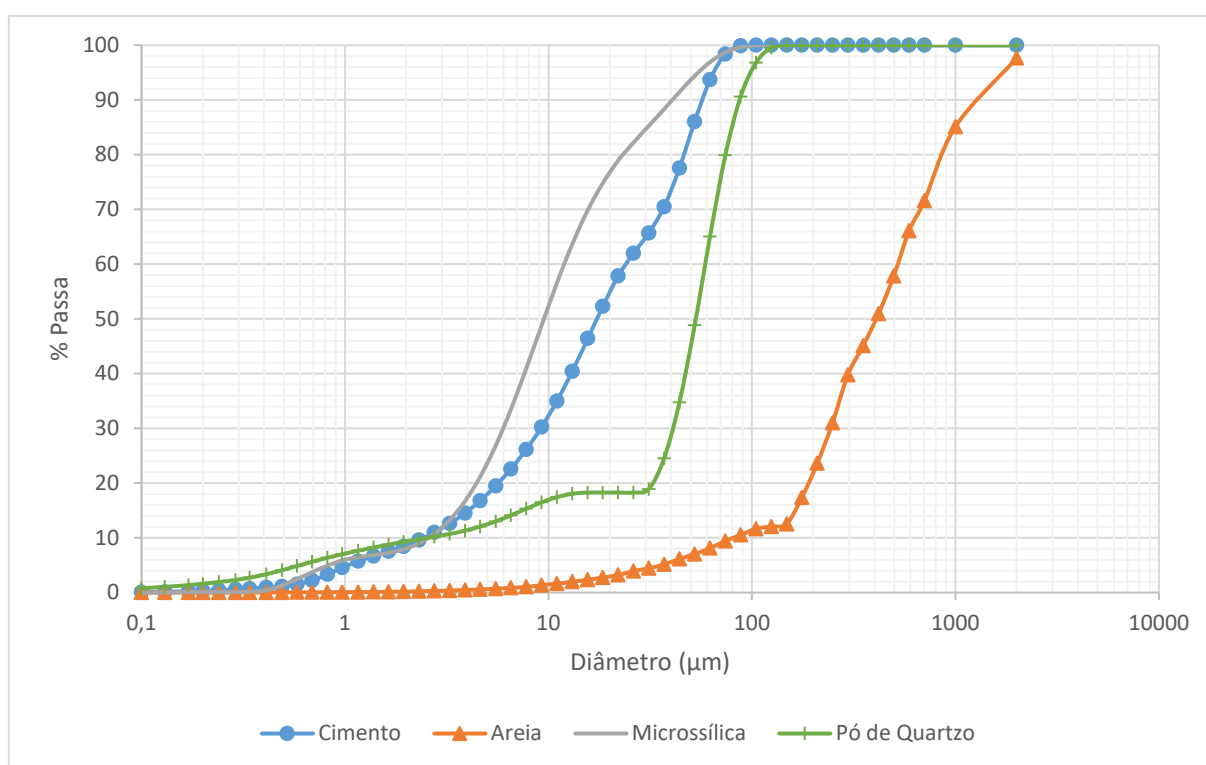
As densidades dos materiais são mostradas na Tabela 3 e a granulometria na Figura 8.

Tabela 3 – Densidade dos materiais utilizados na produção do CUAD

Material	Densidade (g/cm ³)
Cimento	3080
Areia fina	2610
Sílica ativa	2230
Pó de quartzo	2800

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 8 – Distribuição granulométrica dos materiais escolhidos



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2 DOSAGEM

3.2.1 CUAD

Para a dosagem dos concretos presentes nesta pesquisa, foi adotado o modelo de otimização de dosagens de concreto sugerido por Hüsken (2010). A curva teórica da distribuição granulométrica da mistura foi considerada como alvo para uma regressão linear pela abordagem do método dos mínimos quadrados e o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi calculado. O coeficiente R^2 varia entre 0 e 1, e,

neste estudo, um valor alto (próximo de 1) significa uma boa distribuição granulométrica.

R^2 é dado pela Equação 3:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4)$$

Sendo,

$$SST = SSE + SSR$$

$$SSE \text{ (Soma dos erros quadrados)} = \sum [y_i - f(x_i)]^2$$

$$SSR \text{ (Soma dos erros da regressão)} = \sum [f(x_i) - \bar{y}]^2$$

Onde,

y_i : valores da distribuição;

$f(x_i)$: valores da regressão;

$\bar{y}$: valor médio da distribuição.

Um script para Matlab foi desenvolvido para calcular valores de R^2 para diferentes misturas. Todos os materiais, com diferentes quantidades, foram combinados para criar curvas de distribuição granulométrica da mistura de CUAD. Para cada combinação, valores de q entre 0,23 e 0,37 foram testados. Portanto, 2800 valores de R^2 foram calculados em diferentes combinações. O traço foi escolhido considerando um alto valor de R^2 , com proporções alinhadas à revisão da literatura, e consumo reduzido de cimento.

Os valores de entrada para as combinações realizadas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Combinações de materiais para a dosagem dos CUADs

Material	Material/cimento
Areia	0,70
	0,80
	0,90
	1,00
	1,10
Sílica Ativa	0,20
	0,21
	0,22
	0,23
	0,24
Pó de Quartzo (PQ)	0,25
	0,10
	0,11
	0,12
	0,13
	0,14
	0,15

Fonte: Elaborado pelo Autor

As 10 misturas com maiores valores de R^2 foram listadas na Tabela 5 para escolha do traço, indicando também o consumo de materiais em cada mistura por m^3 de CUAD.

Como critério de definição do melhor traço, foi definido o traço com maior R^2 . Como critério de desempate foi escolhido o traço com menor consumo de cimento por m^3 . O traço definido é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Definição do traço de CUAD.

#	q	Cimento (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Sílica Ativa (kg/m^3)	PQ (kg/m^3)	R^2
1	0,23	891	980	178	116	0,874
2	0,23	888	977	178	124	0,873
3	0,23	894	983	179	107	0,872
4	0,23	897	986	179	99	0,871
5	0,23	883	971	185	124	0,871
6	0,23	900	990	180	90	0,870
7	0,23	886	975	186	115	0,870
8	0,23	889	978	187	107	0,870
9	0,23	892	981	187	98	0,869
10	0,23	878	966	193	123	0,869

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.1.1 Substituição de cimento por cinzas

Como alternativa para a diminuição do consumo de cimento e, potencialmente, a redução dos impactos ambientais do CUAD, cinzas de casca de arroz (CCA) e do bagaço da cana de açúcar (Figura 9) foram utilizadas em substituição ao cimento.

Figura 9 – (a) cinza de casca de arroz e (b) cinza do bagaço da cana de açúcar



Fonte: Elaborado pelo Autor

As porcentagens de substituição foram definidas de acordo com informações levantadas na revisão da literatura, apresentada no capítulo 2, sendo:

- Cinza de casca de arroz: 10% e 20%;
- Cinza do bagaço da cana de açúcar: 10% e 20%.

As cinzas foram submetidas a queima em mufla a 600°C por 3 horas para eliminação de matéria orgânica residual do processo de queima da casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar.

Sendo assim, a Tabela 6 apresenta os traços produzidos na pesquisa.

Tabela 6 – Traços de CUAD em kg/m³

Traço	Cimento	Areia	Sílica Ativa	Pó de Quartzo	CCA	CBCA	Superplastificante	Água
REF	891,0	980,0	178,0	116,0	-	-	35,6	267
CCA10	801,9	980,0	178,0	116,0	89,1	-	35,6	267
CCA20	712,8	980,0	178,0	116,0	178,2	-	35,6	267
CBCA10	801,9	980,0	178,0	116,0	-	89,1	35,6	267
CBCA20	712,8	980,0	178,0	116,0	-	178,2	35,6	267

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.2 Concreto convencional

A dosagem do concreto convencional foi obtida em Tutikian, Carpena e Molin (2008) para a produção da viga protendida. O traço escolhido para o concreto é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Traço definido de concreto convencional para $f_{ck} = 30$ MPa

Material	Consumo (kg/m ³)
Cimento	437
Brita	838
Areia	559
Água	184
Superplastificante	2,05

Fonte: Adaptado de Tutikian, Carpena e Molin (2008)

3.3 PROCEDIMENTOS DE MISTURA

Para a mistura do CUAD foi utilizada argamassadeira, seguindo o método utilizado por Queiroz (2018) e Viana et al. (2020) e adaptando alguns aspectos com observações feitas na revisão teórica.

1. Adição de sílica ativa, pó de quartzo e areia fina;
2. Mistura seca dos materiais em velocidade lenta por 2 minutos;
3. Adição de 50% de cimento e mistura em velocidade por 30 segundos;
4. Adição do restante de cimento e mistura em velocidade lenta por 30 segundos;
5. Adição de superplastificante misturado à água;
6. Mistura em velocidade alta por 10 minutos;
7. Moldagem dos corpos de prova.

3.4 CURA

3.4.1 Cura convencional submersa

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas. Para a cura convencional, os corpos de prova foram inseridos em tanque de cura com água e óxido de cálcio até o 28º dia após a moldagem.

3.4.2 Cura a Vapor

Assim como na cura convencional, os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas para submissão à cura a vapor. Os corpos de prova foram inseridos em estufa com recipiente preenchido por água em temperatura de 90°C por 48 horas.

Após a cura a vapor os corpos de prova foram submetidos a cura submersa até a data de realização dos ensaios.

3.5 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

O ensaio de determinação do índice de consistência normal foi realizado para avaliar a trabalhabilidade do CUAD e também a influência das diferentes porcentagens de substituição das cinzas de casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar na fluidez do material. O ensaio foi realizado seguindo as recomendações do Anexo B da ABNT NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Ensaio de resistência à compressão foram realizados com 4 corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 10). 28 dias após a moldagem. Os corpos de prova foram submetidos a máquina retífica para planificação de suas superfícies.

Os ensaios foram feitos seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996). Uma máquina universal de ensaios EMIC com célula de carga de 2000 kN foi utilizada e uma taxa de carregamento de 0,20 MPa/s foi aplicada (Figura 11).

Os resultados de resistência à compressão média foram utilizados para o cálculo do f_{ck} dos CUADs desenvolvidos, sendo a fórmula para cálculo:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \times SD \quad (5)$$

Onde,

f_{ck} = Resistência característica à compressão;

f_{cm} = Resistência média dos ensaios de resistência à compressão

SD = Desvio padrão dos ensaios de resistência à compressão

Figura 10 – Corpo de prova cilíndrico de CUAD



Fonte: Autor

Figura 11 – Máquina universal de ensaios EMIC



Fonte: Autor

3.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os ensaios de resistência à tração na flexão a 3 pontos foram realizados de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram produzidos 3 corpos de prova prismáticos com base quadrada de 4 cm x 4cm e comprimento de 16 cm. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios EMIC, com célula de carga de 300 kN sob taxa de incremento de força de 500 N/s.

3.8 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Ensaio de módulo de elasticidade foram realizados seguindo os procedimentos definidos na NBR 8522 (ABNT, 2017). Foram produzidos 3 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Os corpos de prova foram submetidos a três ciclos de carregamento com tensão limite de 30% da resistência esperada para a resistência à compressão em taxas de carregamento e descarregamento de 0,45 MPa/s. Deformações foram medidas com a utilização de um extensômetro.

3.9 DIMENSIONAMENTO DA VIGA PROTENDIDA

3.9.1 Projeto de viga

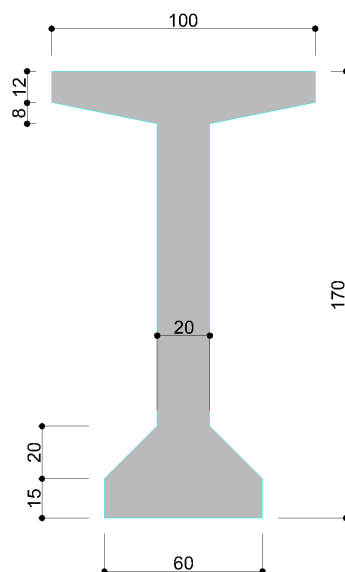
Para o dimensionamento da viga protendida em CUAD foi utilizado o projeto de uma viga protendida rodoviária isostática existente. A estrutura original possui um vão total de 200 metros, sendo 8 vãos de 25 metros, com f_{ck} definido de 30 MPa, conforme indicado nas Figuras 12 e 13.

O dimensionamento foi realizado para um vão de 25 metros. Pela ausência de normas que estabeleçam critérios de dimensionamento para o CUAD, foi utilizada a ABNT NBR 6118, adotando valores de f_{ck} , resistência à tração e módulo de elasticidade definidos em ensaios em (NBR, 2014).

Para o dimensionamento da seção transversal e cabos de protensão foi utilizada planilha no *software* Excel criada para o desenvolvimento do trabalho. O dimensionamento de armaduras à flexão realizado no *software* SECC (JUNIOR, [s.d.]).

A Figura 12 apresenta a seção transversal em concreto da viga protendida e a Tabela 8 apresenta o consumo de materiais no projeto original da ponte.

Figura 12 – Seção transversal do projeto original da viga (medidas em cm)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 8 – Materials para a viga protendida em concreto convencional $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Material	Consumo
Concreto	14,2 m ³
Cabos de protensão	676 kg
Armadura para flexão	131 kg

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 13 – Vista longitudinal da ponte com vigas protendidas

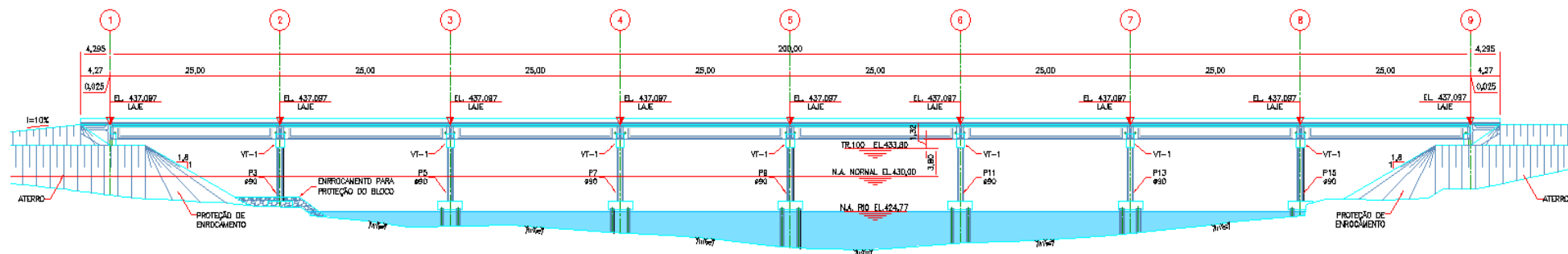
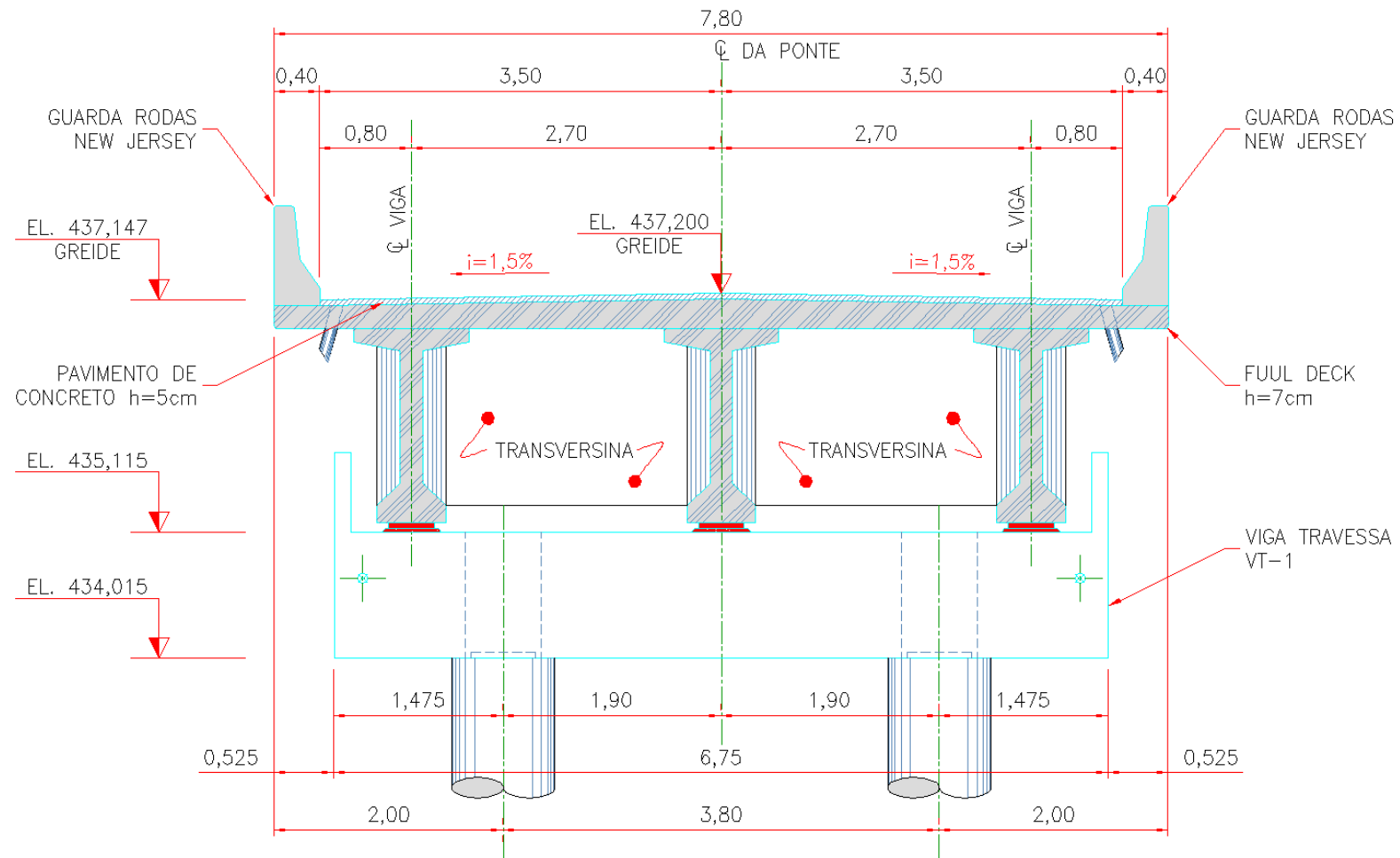


Figura 14 – Seção transversal da ponte com vigas protendidas



3.9.2 Carregamentos

3.9.2.1 Peso próprio

Para os carregamentos da viga, foram considerados o peso próprio da viga, dado pela Equação 4, o peso da tabuleiro instalada, dado pela Equação 5, com altura de 22,5 cm e vão de 2,70 m, conforme indicado na Figura 13.

$$g_0 = A \times \delta \times L \quad (4)$$

Sendo,

g_0 = Carga devida ao peso próprio;

A: Área da seção transversal em m²;

δ : Densidade do concreto igual a 25 kN/m;

L: Comprimento da viga.

3.9.2.2 Cargas permanentes

As cargas permanentes devidas ao peso próprio do tabuleiro foram consideradas seguindo a Equação 5.

$$g_1 = l \times h \times \delta \quad (5)$$

Onde,

g_1 : Carga permanente devida ao peso próprio do tabuleiro;

l: Vão da tabuleiro, apresentado na Figura 12;

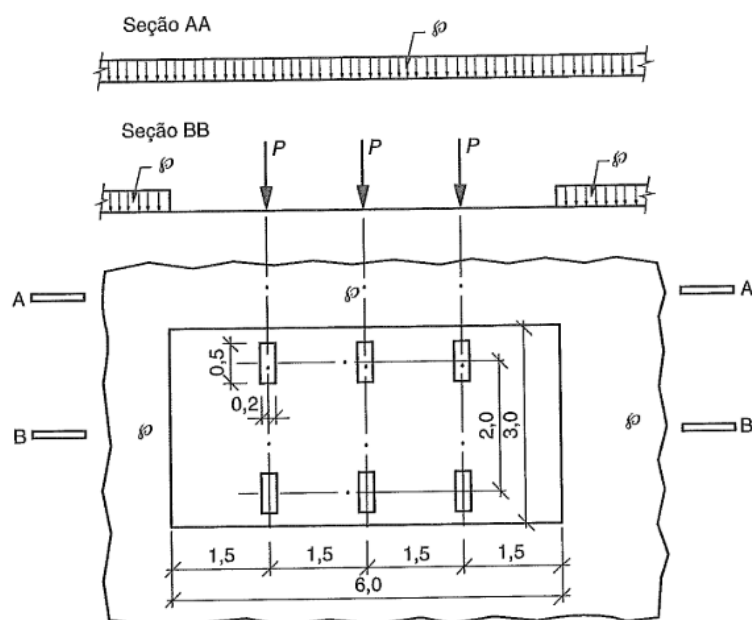
h: Altura da tabuleiro, apresentada na Figura 13;

δ : Densidade do concreto igual a 25 kN/m;

3.9.2.3 Carga móvel

Foi considerada a carga móvel rodoviária padrão TB-450, estipulada pela NBR 7188 (ABNT, 2013). A carga móvel é definida por seis rodas, cada uma com 75 kN, aplicadas em três eixos de carga com 1,5 m de comprimento. É levado em consideração também uma carga distribuída de 5 kN/m² cercando a área de 18 m² do veículo. A Figura 14 ilustra a carga móvel padrão TB-450.

Figura 15 – Carga móvel rodoviária padrão TB-450



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013)

3.10 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O estudo tem como objetivo realizar a avaliação do ciclo de vida (ACV) de uma viga de ponte em concreto convencional e em CUAD e comparar os resultados para a avaliação da viabilidade da utilização de CUAD.

A ACV realizada compreendeu quatro etapas, conforme ABNT NBR ISO 14.040:2006, as quais serão detalhadas a seguir:

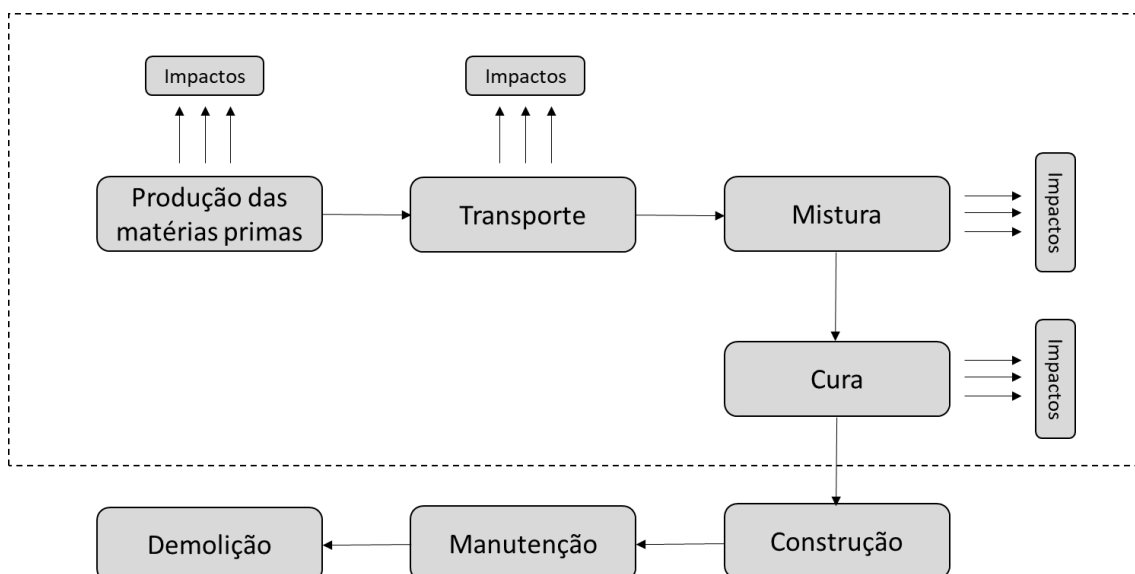
- Descrição do objetivo e escopo;
- Inventário de ciclo de vida (ICV);
- Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV);
- Interpretação dos resultados.

3.10.1 Objetivo e escopo

Essa avaliação do ciclo de vida estudou o estágio de fabricação do CUAD e do concreto convencional, considerando os volumes de concreto necessários para a produção de um elemento estrutural de pontes dos diferentes concretos produzidos e estudados na pesquisa.

Foram considerados os estágios de extração das matérias primas, transporte e produção dos concretos convencional e de ultra alto desempenho, não deixando de observar a diferença nos processos de moldagem e cura dos dois materiais. A Figura 16 ilustra os processos considerados e as delimitações da fronteira do sistema.

Figura 16 – Fronteira do sistema



Fonte: Elaborado pelo Autor

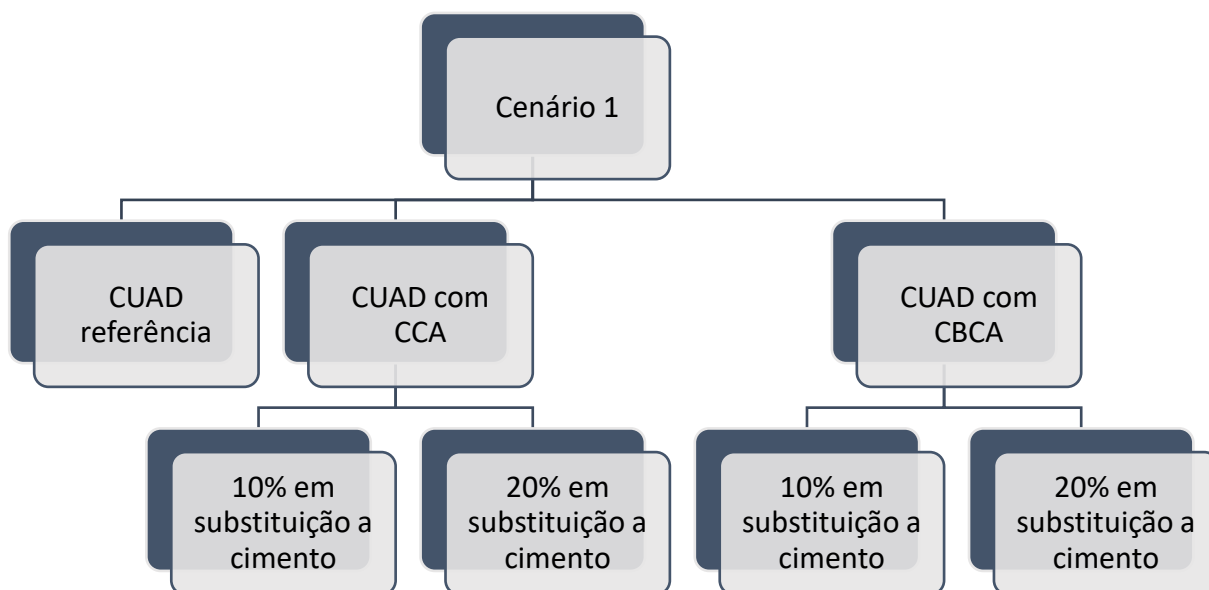
A cidade de Belo Horizonte foi considerada para a abrangência regional da ACV. Para o transporte de materiais, as distâncias entre as cidades originais e Belo Horizonte foi considerada.

Três modelos ACVs comparativas foram executados:

- Comparação dos impactos ambientais da produção de 1 m³ de concreto convencional e CUAD;
- Comparação do dimensionamento de uma viga protendida produzida com concreto convencional e CUAD, considerando curas convencional e a vapor.
- Comparação de CUAD desenvolvido com substituição de cimento por:
 - Cinza de casca de arroz (CCA);
 - Cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA).

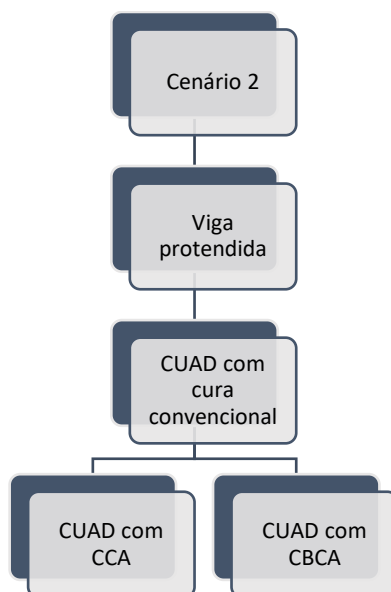
As Figuras 17, 18 e 19 e mostram os diferentes cenários considerados na ACV.

Figura 17 – Cenário 1: considerado na ACV



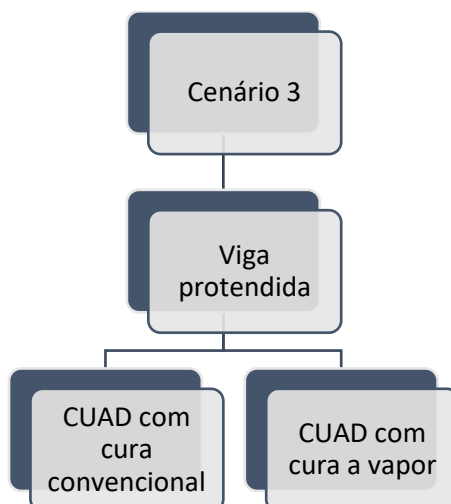
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 18 – Cenário 2: Viga protendida em concreto convencional x em CUAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 19 – Cenário 3: CUAD com cura convencional x CUAD com cura a vapor



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.10.2 Inventário do Ciclo de Viga (ICV)

3.10.2.1 Materiais

Os resultados dos traços de concreto e do consumo de material para a produção das vigas serviram de base para os dados de entrada na ICV. Os dados da ICV foram extraídos das bases de dados Ecoinvent e entradas manuais de acordo com a revisão da literatura para materiais não disponíveis nas bases de dados. O *software OpenLCA* foi utilizado.

Os materiais definidos para a produção do CUAD e o traço escolhido no processo de dosagem foram usados como dados de entrada do ICV do CUAD. Dados de cimento, areia e pó de quartzo foram extraídos da base de dados *Ecoinvent*.

Dados para sílica ativa e superplastificante não foram encontrados nas bases de dados utilizadas. Foi necessário, portanto, a realização de pesquisas mais aprofundadas na literatura para definição dos processos envolvidos na produção dos materiais.

A sílica ativa, resíduo da produção de ferro silício (SIDDIQUE; CHAHAL, 2011), pode ser considerada na entrada de dados de uma ACV como rejeito ou como coproduto. Sendo considerada rejeito, é feita uma alocação para a atribuição dos impactos ambientais do material. Os valores de produção e alocação da Sílica Ativa são apresentados na Tabela 9.

A pós queima de CCA e CBCA para utilização em concreto não foi considerada na ACV. Foi considerada, portanto, a utilização das cinzas produzidas em processo de queima em condições ideais para utilização em concreto.

Informações mais precisas encontradas foram disponibilizadas na declaração ambiental para aditivos superplastificantes (EFCA, 2002). Os valores são informados na Tabela 10.

Tabela 9 – Sílica Ativa

	Produção (toneladas)	Valor de mercado	Alocação por massa	Alocação por valor econômico
Ferro silício	1 t	U\$ 3.145	-	-
Sílica Ativa	0,45 t	U\$ 353	4,8%	31%

Fonte: Adaptado de Timm, Moreales e Pasuello (2019)

Tabela 10 – Produção de 1 kg de superplastificante

Matéria prima	Unidade	Valor
Carvão	g	62
Óleo cru (matéria prima)	g	91
Óleo Cru (combustível)	g	74
Gás natural (matéria prima)	dm ³	0,13
Gás natural (combustível)	m ³	0,21
Água	kg	7,4

Fonte: EFCA (2002)

Os processos utilizados para todos os materiais da base de dados *Ecoinvent* para o concreto convencional e o CUAD são informados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Processos de entrada para o Concreto Convencional

Material	Processo
Cimento	<i>cement production, Portland cement, Portland APOS,U - RoW</i>
Areia	<i>silica sand production silica sand APOS,U - RoW</i>
Brita	<i>gravel production, crushed gravel, crushed APOS,U - RoW</i>
Água	<i>market for tap water tap water APOS,U - RoW</i>
Superplastificante	<i>market for hard coal hard coal APOS,U - RoW</i>
	<i>market for heavy fuel oil heavy fuel oil APOS,U - RoW</i>
	<i>market for natural gas, liquefied natural gas, liquefied APOS,U - GLO</i>
	<i>market for natural gas, vented natural gas, vented APOS,U - GLO</i>
	<i>market for petroleum petroleum APOS,U - GLO</i>
	<i>market group for tap water tap water APOS,U - GLO</i>

Fonte: Ecoinvent (2020)

Tabela 12 - Processos de entrada para o CUAD

Material	Processo
Cimento	<i>cement production, Portland cement, Portland APOS,U - RoW</i>
Areia	<i>silica sand production silica sand APOS,U - RoW</i>
Sílica Ativa	<i>ferrosilicon production ferrosilicon APOS,U - RoW</i>
Pó de Quartzo	<i>silica sand production silica sand APOS,U - RoW</i>
Superplastificante	<i>market for hard coal hard coal APOS,U - RoW</i>
	<i>market for heavy fuel oil heavy fuel oil APOS,U - RoW</i>
	<i>market for natural gas, liquefied natural gas, liquefied APOS,U - GLO</i>
	<i>market for natural gas, vented natural gas, vented APOS,U - GLO</i>
	<i>market for petroleum petroleum APOS,U - GLO</i>
	<i>market group for tap water tap water APOS,U - GLO</i>
Água	<i>tap water production, conventional treatment tap water APOS,U - RoW</i>

Fonte: Ecoinvent (2020)

3.10.2.2 Transporte

Para a avaliação da contribuição do transporte dos materiais nos impactos ambientais do CUAD e do concreto convencional, foram definidas as distâncias entre as cidades de origem e destino dos materiais (Tabela 13). Para a realização do estudo, foi considerado o modal rodoviário para o transporte dos materiais.

Tabela 13 – Distâncias de transporte dos materiais

Material	Cidade de Origem	Cidade de Destino	Distância
Cinza de Casca de Arroz	Alegrete – RS	Belo Horizonte	2.203 km

Cinza do bagaço da cana de açúcar	BambuÍ - MG	Belo Horizonte	269 km
SÍlica Ativa	Santos Dumont – MG	Belo horizonte	216 km
Cimento	Pedro Leopoldo - MG	Belo Horizonte	40,4 km
Superplastificante	Itatiba – SP	Belo Horizonte	559 km

Fonte: Google (2020)

A base de dados Ecoinvent foi utilizada para a criação do inventário do ciclo de vida para transporte dos materiais. As distâncias apresentadas na Tabela 13, foram utilizadas como dados de entrada para uma unidade de kg.km. A definição dos processos utilizados para a consideração dos impactos de transporte foi feita tendo como base os princípios adotados por Silva (2015). Os processos da base Ecoinvent utilizados no *OPenLCA* para cada material são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Processos da base de dados Ecoinvent utilizados no *software OpenLCA*

Material	Processo utilizado
Cimento	<i>market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 APOS,U - RoW</i>
Areia	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS,U - RoW</i>
Cinza de Casca de Arroz	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS,U - RoW</i>
Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS,U - RoW</i>
SÍlica Ativa	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS,U - RoW</i>
Superplastificante	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS,U - RoW</i>

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.10.2.3 Cura

Para a consideração da cura no ICV foi necessário criar modelos que se aproximassem da aplicação prática para uma viga com vão de 25 metros. Entre modelos da literatura e informações de empresas de cura térmica, foi definido como modelo de cura para entrada no *OpenLCA* o *maxTURBOMATIC*, comercializado pela Polarmatic (2020), tendo:

- 1000 kW;
- Alimentação: Gás natural.

3.10.3 Avaliação dos impactos no ciclo de vida (AICV)

No presente trabalho, para a etapa de AICV foi utilizada metodologia *Impact World+*, desenvolvida por Bulle et al. (2019) como uma grande atualização para as metodologias IMPACT 2002+, EDIP e LUCAS, visando uma abordagem *midpoint* focada em dano e regionalizada globalmente. As categorias de impacto analisadas na metodologia são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Categorias de impacto da metodologia *Impact World+*

Categoria de impacto	Unidade
Aquecimento Global, longo prazo	kg CO2 eq (long)
Aquecimento Global, curto prazo	kg CO2 eq (short)
Utilização de energias fóssil e nuclear	MJ deprived
Acidificação aquática	kg SO2 eq
Eco toxicidade aquática	CTUe
Eutrofização	kg PO4 P-lim eq
Toxicidade humana cancerígena	CTUh
Toxicidade humana não cancerígena	CTUh
Radiações ionizantes	Bq C-14 eq
Uso de solo, biodiversidade	m2 arable land eq .yr
Transformação de solo, biodiversidade	m2 arable land eq
Eutrofização marinha	kg N N-lim eq
Utilização de recursos minerais	kg deprived
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq
Formação de material particulado	kg PM2.5 eq
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC eq
Acidificação terrestre	kg SO2 eq
Escassez de água	m3 world-eq

Fonte: Elaborado pelo autor

3.10.3.1 Interpretação dos resultados e análise de sensibilidade

Na interpretação dos resultados foram analisadas as contribuições dos materiais nos impactos ambientais totais do CUAD e do concreto convencional, com a normalização dos valores, a definição das categorias de impacto mais afetadas na produção dos dois tipos de concreto analisados.

Todo valor considerado possui uma incerteza. Considerando também a utilização de dados secundários na ACV e as variabilidades dos processos de obtenção das matérias primas dos concretos, foi necessário verificar a validade do estudo realizado e para isso a análise de sensibilidade dos resultados da ACV foi realizada para testar a robustez do modelo de ACV criado.

Sendo assim, dois casos foram considerados para a análise de sensibilidade do modelo criado na pesquisa, sendo chamados de Caso 1 e Caso 2.

Para o caso 1, a ACV foi realizada também com uma diferente metodologia na AICV, visando confirmar os resultados obtidos. A metodologia Recipe 2016 Midpoint (H) foi definida para para a ACV comparativa entre a viga protendida em concreto convencional e a viga protendida em CUAD. As categorias de impacto da metodologia Recipe 2016 *midpoint* (h) são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Categorias de impacto ambiental da metodologia Recipe 2016 *midpoint* (H)

Categoria de impacto	Unidade
Ocupação de solo para agricultura	m2a
Aquecimento global	kg CO2-Eq
Consumo de combustíveis fósseis	kg oil-Eq
Eco toxicidade aquática	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofização	kg P-Eq
Toxicidade humana	kg 1,4-DCB-Eq
Radiações ionizantes	kg U235-Eq
Eco toxicidade marinha	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofização marinha	kg N-Eq
Depleção de metais	kg Fe-Eq
Transformação do solo	m2
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11-Eq
Formação de material particulado	kg PM10-Eq
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC
Acidificação terrestre	kg SO2-Eq
Eco toxicidade terrestre	kg 1,4-DCB-Eq
Uso de solo urbano	m2a
Depleção de recursos hídricos	m3

Fonte: Huijbregts et al. (2017)

Para o Caso 2 a análise de sensibilidade do modelo da pesquisa foi feita com a realização da ACV comparativa por m³ do CUAD referência considerando duas situações da sílica ativa:

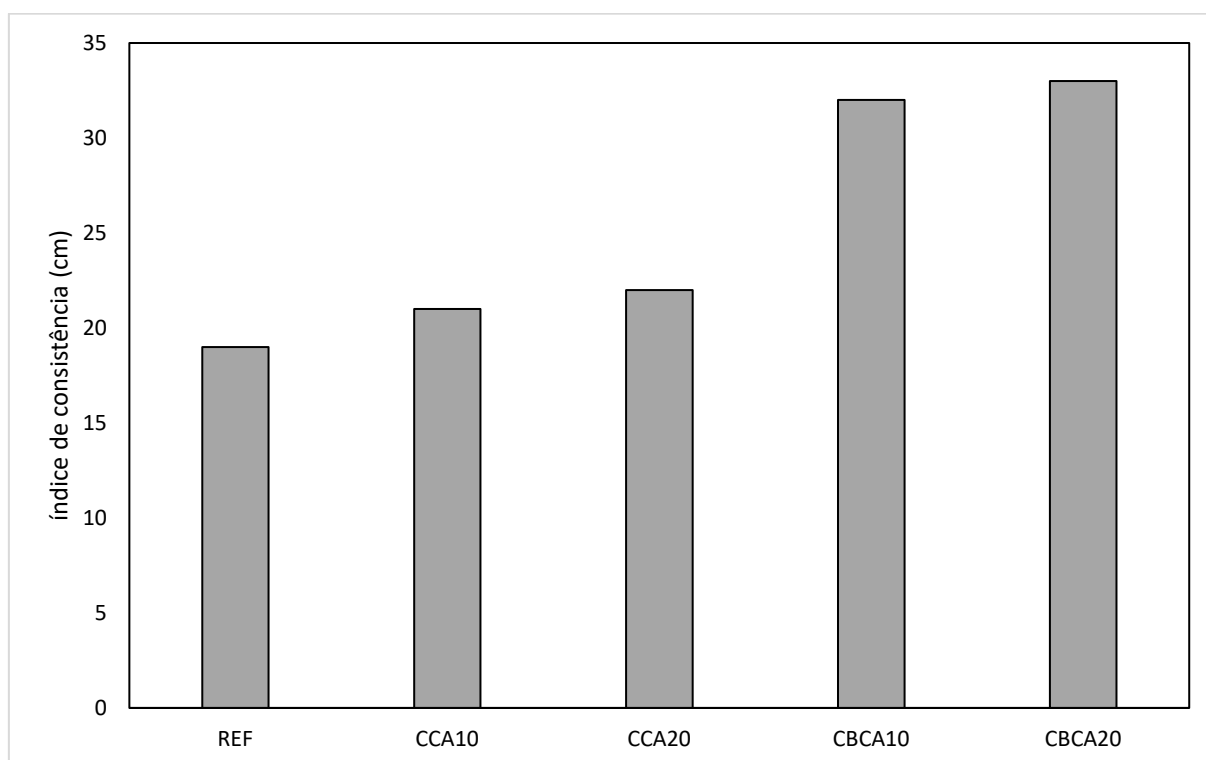
- Sílica ativa como coproduto, com alocação dos impactos ambientais da produção do ferro silício.
- Sílica ativa como resíduo, com impactos ambientais causados apenas pelo transporte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

O ensaio de índice de consistência foi realizado ao fim do processo de mistura dos diferentes traços de CUAD. Os resultados são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Resultados do índice de consistência para os diferentes traços de CUAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

É possível afirmar que a substituição de cimento pelas cinzas em porcentagens de até 20% é vantajosa para a trabalhabilidade do CUAD. Tanto a cinza de casca de arroz quanto a cinza de bagaço da cana de açúcar aumentaram os resultados de espalhamento do CUAD.

A variação da porcentagem de cinzas pouco influenciou nas propriedades reológicas do CUAD. A substituição de cimento por cinza de casca de arroz nas porcentagens de 10% e 20% aumentou o índice de consistência em 11% e 16%, respectivamente. A inclusão da cinza de bagaço da cana de açúcar como substituição parcial de cimento aumentou a trabalhabilidade do CUAD em 68% para substituição de 10% e 76% para substituição de 20%.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resultados de resistência à compressão foram obtidos em ensaios em laboratório 28 dias após a moldagem. Foram testados traços de CUAD referência e com substituição parcial de cimento por cinzas de casca de arroz e de bagaço da cana de açúcar em porcentagens de 10 e 20%. Corpos de prova foram submetidos à cura convencional (submersa) e a vapor. Os resultados das médias de 4 corpos de prova são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão

Traço	Resistência Média à Compressão (MPa)		Desvio Padrão (MPa)		CV (%)	
	Cura submersa	Cura a vapor	Cura submersa	Cura a vapor	Cura submersa	Cura a vapor
REF	80,4	69,5	5,4	11,7	7	17
CCA10	90,3	81,8	3,5	9,5	4	12
CCA20	80,4	74,1	6,5	7,5	8	10
CBCA10	83,0	67,1	3,1	8,4	4	13
CBCA20	72,2	60,1	8,6	4,7	12	8

Fonte: Elaborado pelo Autor

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com teste de Tukey, para avaliar se houve diferença significativa dos resultados de resistência à compressão. Analisando os resultados da ANOVA, é possível afirmar que há diferença significativa nos resultados para resistência à compressão.

Analisando mais profundamente, os resultados do teste de Tukey sugerem que a única diferença significativa observada é entre os resultados de resistência à compressão dos traços de CUAD CCA10 e CBCA20.

Na ANOVA executada, para um nível de significância de 0,05 foi observado que as populações são significativamente diferentes. Isto significa que é possível afirmar que as médias obtidas nos traços desenvolvidos são diferentes.

No teste de Tukey foi possível definir que, para o nível de significância de 0,05, as médias diferentes são dos traços CUAD CCA10 e CUAD CBCA20. Em relação aos demais traços, não é possível afirmar que as médias obtidas nos ensaios são significativamente diferentes.

A adição de cinza de casca de arroz se mostrou benéfica nas porcentagens de 10 e 20%. Para o traço produzido, a substituição de 10% de cimento por cinza de casca de arroz se mostrou como o melhor nesta comparação, com 12% de ganho de resistência à compressão, embora para 20% de substituição a resistência à

compressão não tenha sofrido alteração em relação ao traço de referência. Os resultados obtidos estão de acordo com o encontrado em Van Tuan et al. (2011), que analisou, entre outros aspectos, os efeitos da substituição de cimento por até 30% de cinza de casca de arroz em CUADs.

Já em relação à cinza do bagaço da cana de açúcar, a substituição de cimento por 10% do material não alterou a resistência à compressão do CUAD. A opção de substituição de cimento por 20% da cinza do bagaço da cana de açúcar resultou em perda de 10% de resistência em relação ao traço de referência. Os resultados obtidos são compatíveis com os descritos por Rajasekar et al. (2018), que observou valores ótimos de ganho de resistência à compressão do CUAD em substituições de cimento por CBCA em até 15% de peso.

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova de CUAD submetidos à cura a vapor apresentaram a mesma tendência observada nos ensaios com cura convencional. A cinza de casca de arroz em porcentagens de 10% obteve os melhores resultados, 18% maiores que o traço de referência.

A resistência à compressão do CUAD submetido à cura a vapor foi afetada negativamente. Os traços de CUAD produzidos para a cura a vapor tiveram, em média, redução de 13% dos valores de resistência à compressão.

Como os valores obtidos nos ensaios mecânicos são valores médios de resistência, a Tabela 18 indica os f_{ck} s dos CUADs produzidos na pesquisa.

Tabela 18 – f_{ck} s dos CUADs produzidos

Concreto	f_{ck} (MPa)
CUAD	71,6
CCA10	84,5
CCA20	69,7
CBCA10	77,9
CBCA20	58,1

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Ensaio de resistência à tração por flexão 3 pontos foram realizados 28 dias após as moldagens dos corpos de prova. Os resultados do ensaio de resistência à tração por flexão são apresentados na Tabela 19.

Assim como nos ensaios de resistência à compressão, a cura a vapor causou impactos negativos na resistência do CUAD à tração. Não houve variação na média da resistência obtida para o CUAD referência e o CCA10, porém para os traços

CCA10, CBCA10 e CBCA 20 a resistência sofreu reduções de 11%, 29% e 17%, respectivamente.

Adicionalmente, com os valores obtidos, foi possível um teste ANOVA para comparar se a diferença entre as médias dos ensaios do CUAD produzido em cura submersa foi significativa. No teste ANOVA não foi possível atestar que a resistência à tração na flexão do CUAD foi afetada pela substituição de cimento por CCA e CBCA.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão

Traço	Resistência à Tração (MPa)		Desvio Padrão (MPa)		CV (%)	
	Cura submersa	Cura a vapor	Cura submersa	Cura a vapor	Cura submersa	Cura a vapor
REF	4,08	4,1	0,48	1,1	12	26
CCA10	3,73	3,6	0,17	0,3	4	9
CCA20	3,84	2,9	0,21	0,1	6	2
CBCA10	4,43	3,4	0,44	1,2	10	37
CBCA20	4,48	2,8	0,34	0,7	8	24

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

A substituição de cimento por cinzas de casca de arroz no CUAD resultou em reduções no módulo de elasticidade do material em relação ao traço CUAD REF. Apesar dessa redução, a variação da porcentagem de substituição de cimento por cinza de casca de arroz não interferiu nos valores de módulo de elasticidade. A substituição de cimento por 10% de cinza de casca de arroz reduziu o módulo de elasticidade em 14% e a substituição de cimento por 20% de cinza de casca de arroz resultou em redução de 16%.

O CUAD com substituição de cimento por 10% cinza do bagaço de açúcar, apesar de ter maior média, tem um alto desvio padrão, o que impossibilita a comprovação da influência positiva da substituição de cimento pelo material. Assim como na resistência à tração na flexão, o teste ANOVA foi realizado para identificar possíveis alterações de média nos resultados causados pela substituição de cimento por CCA e CBCA. Nos resultados da ANOVA, para um nível de significância de 0,05, não foi possível afirmar que a substituição de cimento pelas cinzas afetou o módulo de elasticidade do CUAD.

O CUAD com substituição de cimento por 20% de cinza do bagaço da cana de açúcar teve resultado semelhante aos traços de CUAD com cinza de casca de arroz, com

13% de redução do módulo de elasticidade. Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de Módulo de Elasticidade

Traço	Módulo de Elasticidade (GPa)		Desvio Padrão (GPa)		CV (%)	
	Cura submersa	Cura a vapor	Cura submersa	Cura a vapor	Cura submersa	Cura a vapor
REF	71,8	55,7	13,7	3,8	19	7
CCA10	61,6	62,0	1,0	0,8	2	1
CCA20	60,6	51,3	4,1	1,9	7	4
CBCA10	74,0	51,9	13,1	2,6	18	5
CBCA20	62,1	80,2	0,9	24,9	1	31

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.5 DIMENSIONAMENTO DA VIGA EM CUAD

O dimensionamento das vigas em CUAD foi realizado com auxílio de planilha criada em Excel para a pesquisa e do *software* SECC. Utilizando os resultados obtidos nos ensaios como valores de entrada, para cada regime de cura foram dimensionadas 5 vigas em CUAD e suas armaduras ativas e passivas, sendo:

- Viga em CUAD com traço referência (REF);
- Viga em CUAD com 10% de substituição por cinza de casca de arroz (CCA10);
- Viga em CUAD com 20% de substituição por cinza de casca de arroz (CCA20);
- Viga em CUAD com 10% de substituição por cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA10);
- Viga em CUAD com 20% de substituição por cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA20).

4.5.1 Cura convencional

O dimensionamento da viga em CUAD produzida sob regime de cura convencional foi realizado de acordo com os resultados dos ensaios mecânicos realizados na pesquisa. A Tabela 21 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos dos traços de CUAD produzidos na pesquisa nos regime de cura submersa e a Tabela 22 o consumo de materiais nas vigas protendidas dimensionadas.

Tabela 21 – Propriedades mecânicas dos concretos convencional e CUAD

Traço	f_{ck} (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Concreto convencional	30	2,9	30,7
REF	70	4,1	71,8
CCA10	80	3,7	61,6
CCA20	70	3,7	60,6
CBCA10	80	4,7	74,0
CBCA20	60	4,2	62,1

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 22 – Consumo de materiais nas vigas protendidas de concreto convencional e CUAD sob cura convencional

Totais	Concreto (m ³)	Variação	Aço protensão (kg)	Variação	Aço flexão (kg)	Variação
Concreto Convencional	14,2	-	676	-	150	-
CUAD (REF)	7,6	46,5%	507	25,0%	131	12,5%
CCA10	7,6	46,5%	507	25,0%	131	12,5%
CCA20	7,6	46,5%	507	25,0%	131	12,5%
CBCA10	7,6	46,5%	507	25,0%	131	12,5%
CBCA20	7,6	46,5%	507	25,0%	131	12,5%

Fonte: Elaborado pelo Autor

Apesar das variações dos resultados médios dos ensaios mecânicos realizados, as diferenças das propriedades mecânicas dos CUADs desenvolvidos não foram significativas para reduções das seções transversais devido ao arredondamento das dimensões em 5 cm. Com isso, foi possível realizar o dimensionamento das vigas protendidas com as mesmas áreas de concreto e quantidade de armaduras para protensão e para flexão também se manteve em todos os traços de CUAD produzidos.

Em comparação ao concreto convencional, a utilização do CUAD possibilitou a redução de 46,5% da seção transversal da viga protendida. Cabos de protensão e armaduras de flexão foram reduzidos em 25% e 12,5%, respectivamente.

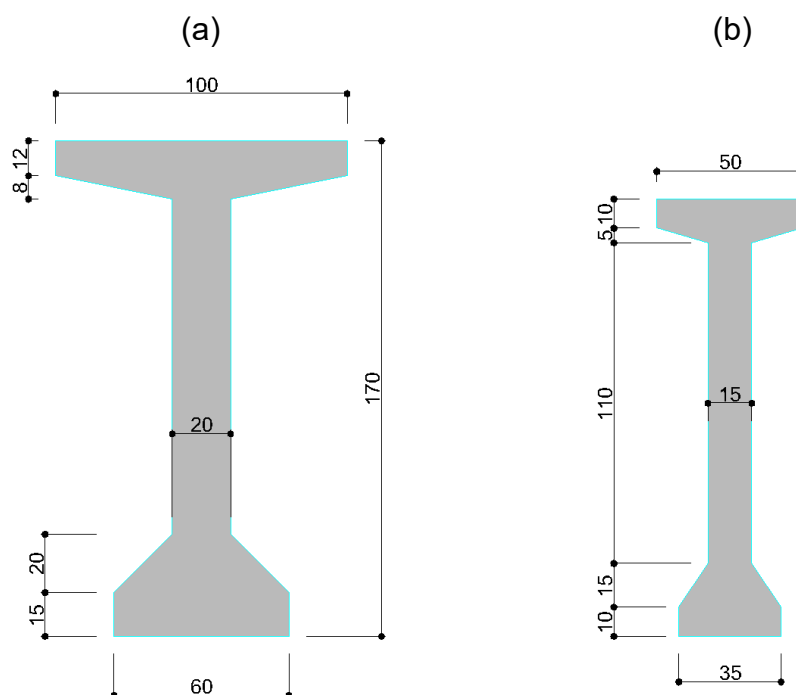
A utilização do CUAD na viga protendida aumentou o consumo de cimento em 11,2% em relação à viga em concreto convencional. A substituição de cimento por CCA e CBCA possibilitou que, para a produção da viga protendida em CUAD, seja consumido menos cimento que para a viga de concreto convencional. Os valores de consumo de cimento são apresentados na Tabela 23 e as seções transversais das vigas protendidas em concreto convencional e em CUAD na Figura 25.

Tabela 23 – Consumo total de cimento nas vigas protendidas

Concreto	Consumo total de cimento (kg)
Concreto Convencional	6092
CUAD (REF)	6772
CCA10	6094
CCA20	5417
CBCA10	6094
CBCA20	5417

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 21 – (a) Seção transversal da viga protendida em concreto convencional e (b) Seção transversal da viga protendida em CUAD (medidas em cm)



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.5.2 Cura a vapor

Assim como na cura convencional, os resultados dos ensaios mecânicos realizados na pesquisa foram base para o dimensionamento das vigas protendidas de CUAD produzido em regime de cura a vapor. Os resultados dos ensaios mecânicos para o CUAD produzido com cura a vapor são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados dos ensaios mecânicos do CUAD submetido ao regime de cura a vapor

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CUAD Vapor	69,5	4,1	55,7

Fonte: Elaborado pelo Autor

Pela menor resistência à tração apresentada pelos corpos de prova nos ensaios de resistência à tração na flexão, houve a necessidade de utilizar um cabo de protensão a mais em relação às vigas em CUAD sob cura convencional nas vigas dos traços CCA20, CBCA10 e CBCA 20. O consumo de materiais para as vigas de CUAD produzidos sob cura a vapor é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Consumo de materiais nas vigas protendidas de concreto convencional e CUAD sob cura a vapor

Totais	Concreto (m ³)	Variação	Aço protensão (kg)	Variação	Aço flexão (kg)	Variação
Concreto Convencional	14,2	-	676	-	150	-
CUAD Vapor	7,6	46,5%	507	25,0%	131	12,5%

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

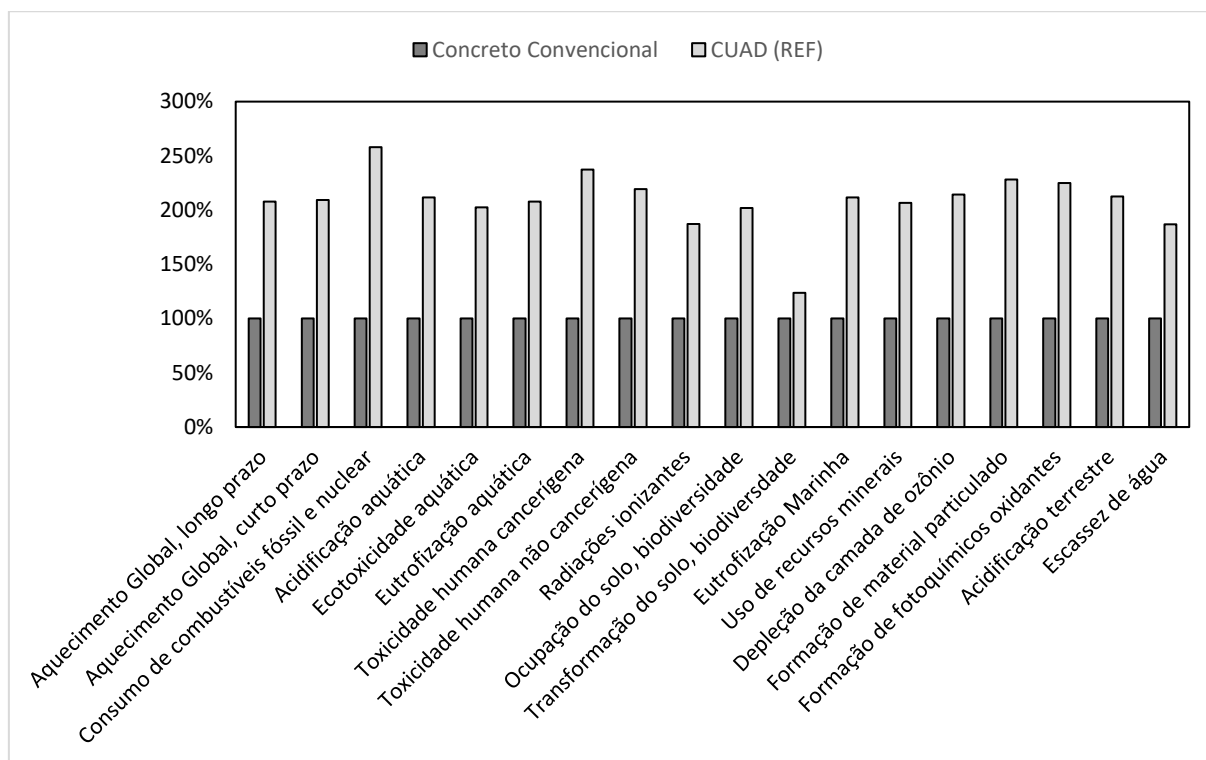
Os resultados da AICV primeiramente foram obtidos para a comparação entre o concreto convencional e o CUAD. As comparações foram feitas em duas normalizações dos dados: levando em conta os valores totais, considerando os resultados do concreto convencional como valor de referência (100%).

Os impactos globais normalizados comparando as AICVs dos concretos convencional e CUAD são apresentados na Figura 26. Na comparação por m³ com o concreto convencional, o CUAD foi confirmado com material com maiores impactos ambientais para sua produção.

A categoria com menor aumento do CUAD em relação ao concreto convencional foi a de ocupação do solo. Como ilustrado na Figura 27, a principal responsável pelos impactos nessas categorias é a brita, que não é utilizada na produção do CUAD.

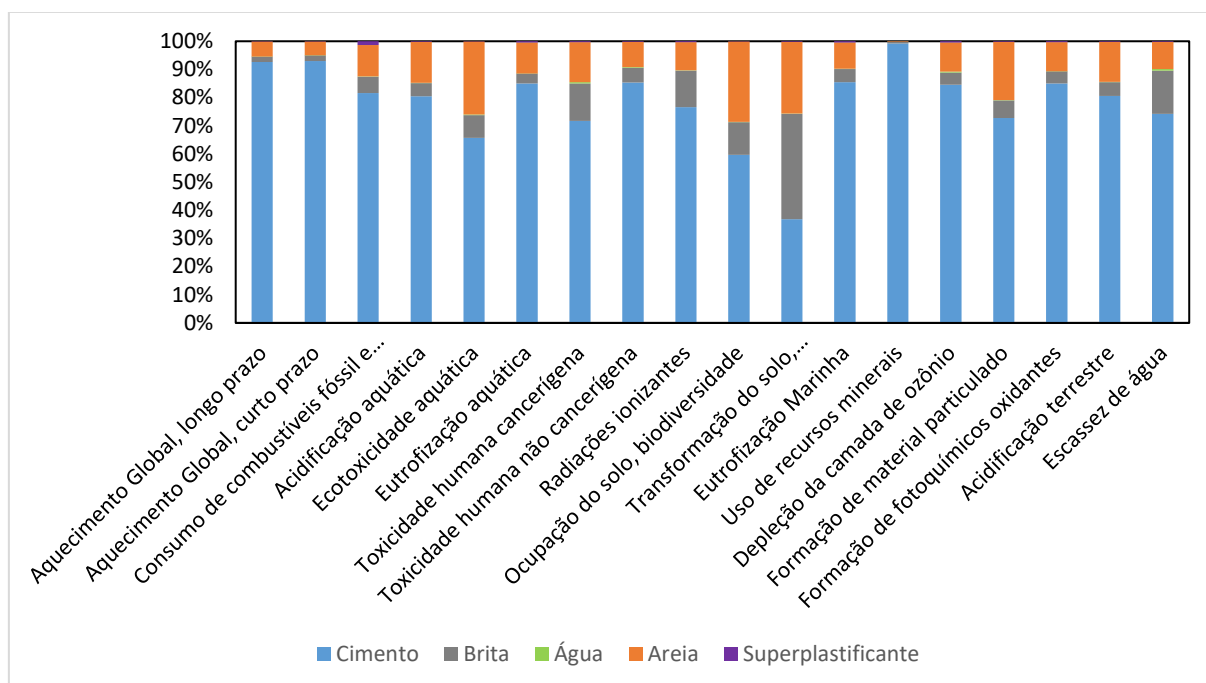
Como pode ser observado nas Figuras 27 e 28, o cimento é o maior responsável pelos impactos ambientais em todas as categorias estudadas para o concreto convencional e o CUAD. O aumento dos impactos do CUAD em relação ao concreto convencional se deve, portanto, em grande parte, à alta quantidade de cimento utilizada em sua produção.

Figura 22 – Resultados da AICV do CUAD por m³ com normalização baseada no concreto convencional



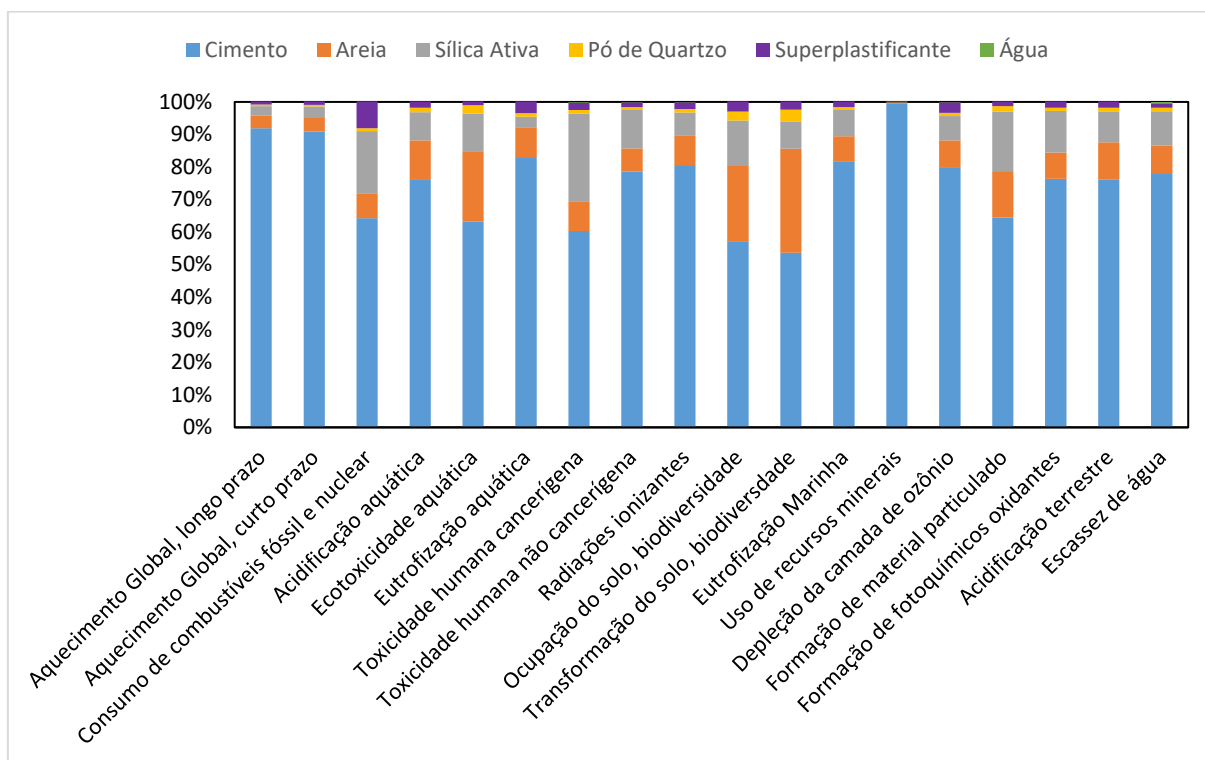
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 23 – Contribuições dos materiais nos impactos ambientais do concreto convencional



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 24 – Contribuições dos materiais nos impactos ambientais do CUAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

Embora grande parte dos impactos seja consequência da utilização do cimento, essa utilização pode mascarar o impacto de outros materiais. O CUAD utiliza materiais diferentes do concreto convencional, que podem não ter grandes contribuições nos resultados finais dos impactos ambientais do CUAD, mas contribuem significativamente nos impactos ambientais quando comparados aos resultados do concreto convencional.

Portanto, foi necessária também uma análise mais aprofundada dos materiais e das contribuições dos seus processos produtivos nos resultados da ACV.

Nas categorias de aquecimento global a curto e longo prazo, a produção do clínquer para o cimento se destaca como o maior contribuinte dos impactos ambientais. 88% dos impactos de aquecimento global são causados pela produção do clínquer.

Impactos de consumo de combustíveis fósseis e nuclear também são causados em grande parte pela produção do clínquer, responsável por 64% do total do CUAD na categoria. Neste caso, a utilização de óleo combustível pesado na produção do cimento é o motivo dos altos valores observados.

A categoria de impacto de toxicidade humana considerando efeitos carcinogênicos também tem o clínquer na produção do cimento como maior responsável pelos valores de impactos ambientais obtidos (47%) com diferentes usos de energia. Porém, é importante observar que entre todos os processos produtivos dos materiais da composição do CUAD, a queima do carvão mineral na produção do ferro silício e, consequentemente, da sílica ativa, contribui com 20% dos impactos totais de toxicidade humana cancerígena, com emissões em água de cromo hexavalente, íons de arsênio e íons de níquel como fluxos mais impactantes nas categorias.

A sílica ativa, usada em 20% de peso de cimento no CUAD, é responsável por cerca de 3% dos impactos de aquecimento global do material, sendo assim uma potencial candidata para utilização em concretos como material sustentável.

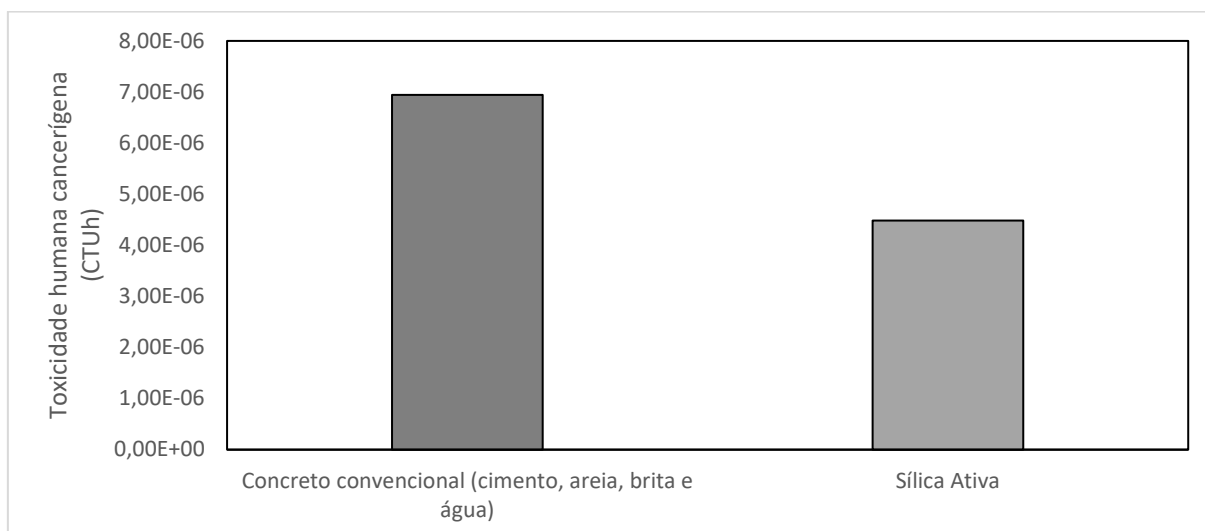
Entretanto, a utilização da sílica ativa traz ao CUAD impactos de toxicidade humana considerando efeitos carcinogênicos que não estariam presentes no concreto convencional. Tais impactos são causados, em boa parte, pela emissão de cromo hexavalente na água, resíduo da produção do ferro silício. Para apenas os 20% de adição em peso de cimento, os impactos da sílica ativa na categoria correspondem a 65% dos impactos totais do concreto convencional.

A diferença de impactos da sílica ativa nas categorias de aquecimento global e de toxicidade humana considerando efeitos carcinogênicos demonstra a importância da realização da ACV para um melhor entendimento sobre o uso do material em concretos com objetivos de melhorar a sustentabilidade.

Os impactos da sílica ativa e sua comparação em relação ao concreto convencional podem ser observados na Figura 29.

Também levando os valores do concreto convencional como valor de referência, foi feita a normalização para 1 MPa de concreto, possibilitando que a resistência à compressão obtida fosse levada em consideração. A normalização foi realizada dividindo os valores do CUAD apresentados na Figura 26 pelas resistências obtidas para o CUAD, apresentadas na Tabela 26.

Figura 25 – Impactos de toxicidade humana da sílica ativa em comparação ao concreto convencional



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 26 – Valores de resistência à compressão dos traços de CUAD produzidos

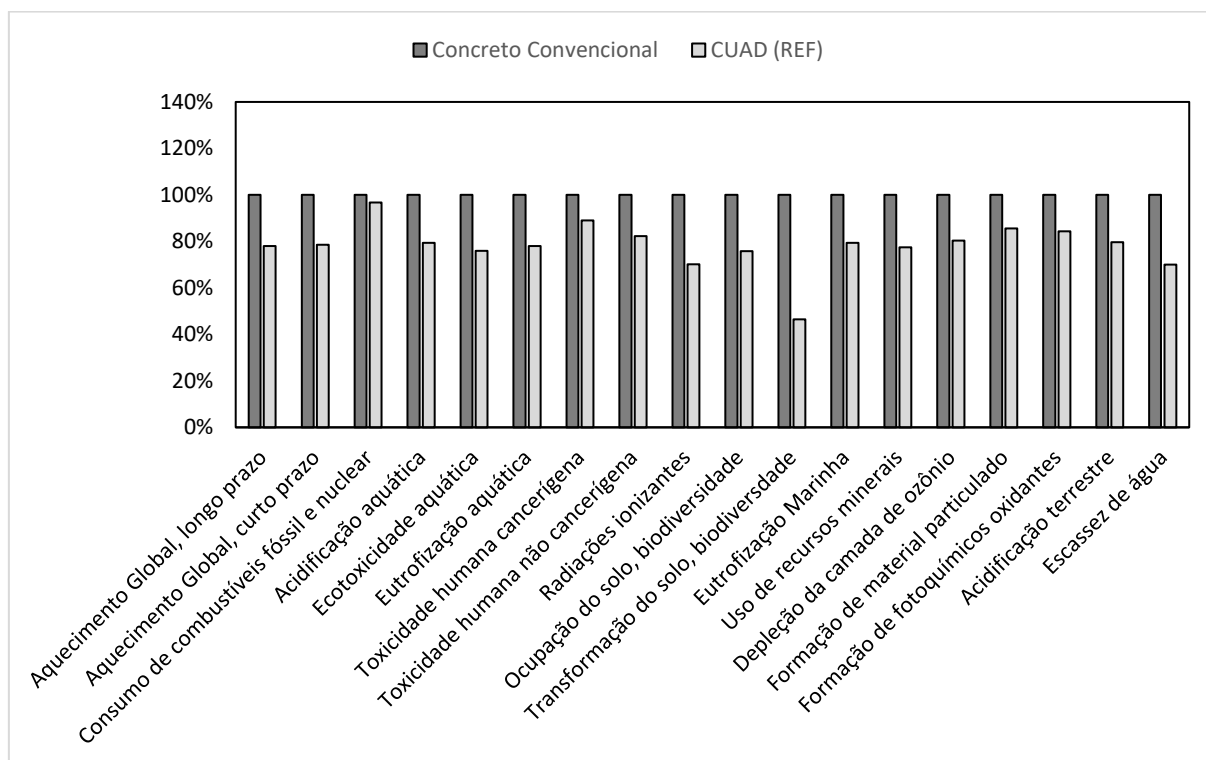
Material	Resistência à compressão (MPa)
Concreto Convencional	30
CUAD (REF)	80,4
CCA10	90,3
CCA20	80,4
CBCA10	83
CBCA20	72,2

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados da normalização por MPa indicam o potencial sustentável do CUAD por ter um menor “custo ambiental” por MPa que o convencional, já que seus impactos ambientais são menores que o do concreto convencional de $f_{ck} = 30$ MPa em todas as categorias de impacto.

A comparação da ACV pela produção de m^3 do CUAD possibilita observar as vantagens do CUAD em termos de redução de impactos ambientais. A redução dos impactos ambientais por MPa resultante na produção do concreto indica uma vantagem do material nos resultados da ACV, ajudando a tomada de decisão em relação ao uso do material no ponto de vista da sustentabilidade antes do dimensionamento de vigas protendidas.

Figura 26 - Resultados da AICV normalizados por MPa



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.1.1 CUAD com cinzas de casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar

CUADs com substituição parcial por cinza de casca de arroz e cinza do bagaço da cana do açúcar foram produzidos em proporções de 10 e 20%. Os resultados da AICV para os CUADs produzidos com CCA e CBCA são apresentados nas Figuras 31 e 32, respectivamente.

As duas cinzas utilizadas na pesquisa são rejeitos de processos produtivos siderúrgico e agrícola e, portanto, tiveram como valores de entrada apenas as distâncias e quantidades para quantificação dos impactos por transporte. Como apresentado na Tabela 13, a distância considerada para transporte da cinza do bagaço da cana de açúcar foi de 269 km e a da cinza de casca de arroz foi de 2.203 km.

As emissões de CO₂, medidas nas categorias de impacto de Aquecimento Global a curto e longo prazo, são o grande foco de pesquisas relacionadas à produção do CUAD (HABERT et al., 2013; MOSABERPANAH; EREN, 2018; YU; SPIESZ; BROUWERS, 2015). Os impactos de Aquecimento Global são reduzidos em 5% e 9% nos traços de CUAD CCA10 e CCA20, respectivamente, e em 7% e 14% nos traços de CUAD CBCA10 e CBCA20, respectivamente.

Apesar do grande potencial de redução de impactos ambientais da cinza de casca de arroz, sua utilização em grandes porcentagens pode ser prejudicial ao CUAD em relação a impactos ambientais. Para a substituição de 10% de cimento por cinza de casca de arroz, resultados positivos são observados na ACV e os impactos ambientais são reduzidos em todas as categorias de impacto consideradas na metodologia.

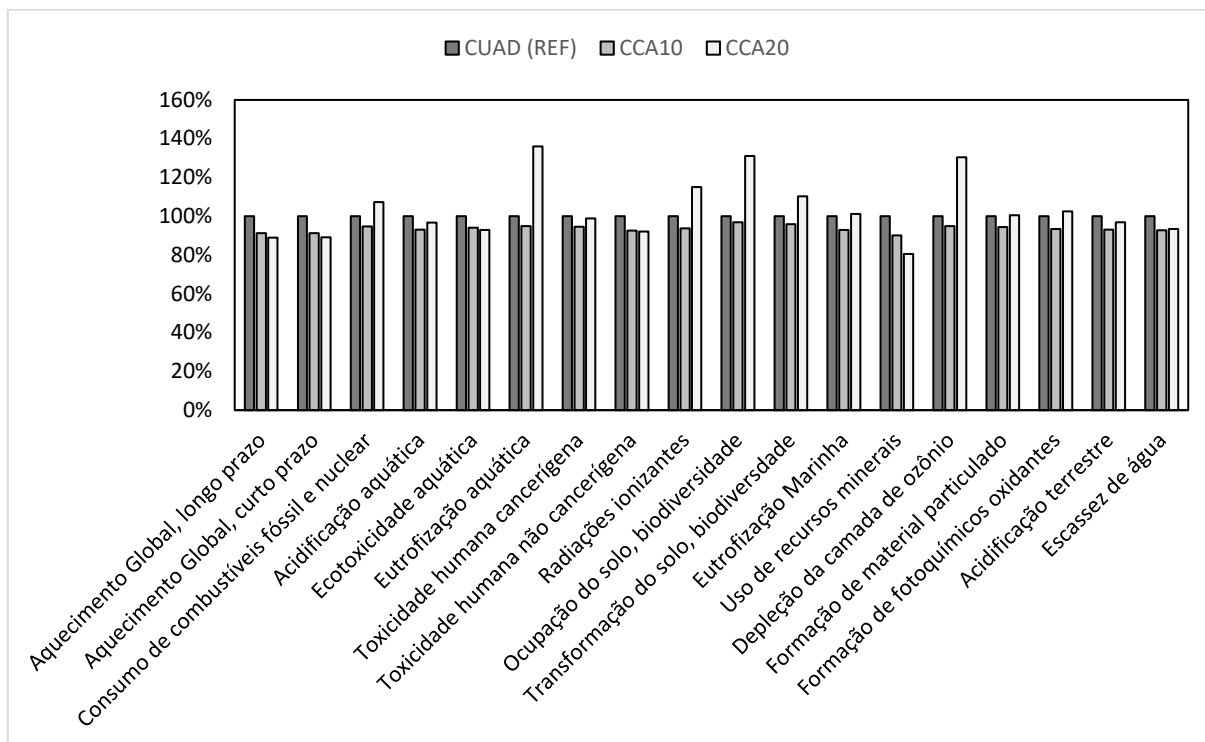
Para 20% de substituição em peso cimento é necessário o transporte de um volume maior de cinza de casca de arroz, que resulta em aumentos de 7%, 36%, 15%, 31%, 10% e 30% nas categorias “Consumo de combustíveis fósseis”, “Eutrofização aquática”, “Radiações ionizantes”, “Ocupação do solo”, “Transformação do solo” e “Depleção da camada de ozônio”.

O aumento nos impactos ambientais do CUAD CCA20 se deve pelo aumento da quantidade de material transportado nas grandes distâncias consideradas da CCA. A influência do óleo diesel, utilizado como combustível no transporte, pode ser observada na alteração dos valores das categorias (Tabela 27).

Ao contrário da CCA, a CBCA reduz os impactos de todas as categorias de impacto, com uma média de 6% para o CUAD CBCA 10 e 13% para o CUAD CBCA20. Essa redução nos impactos é devida às menores distâncias de transporte do material.

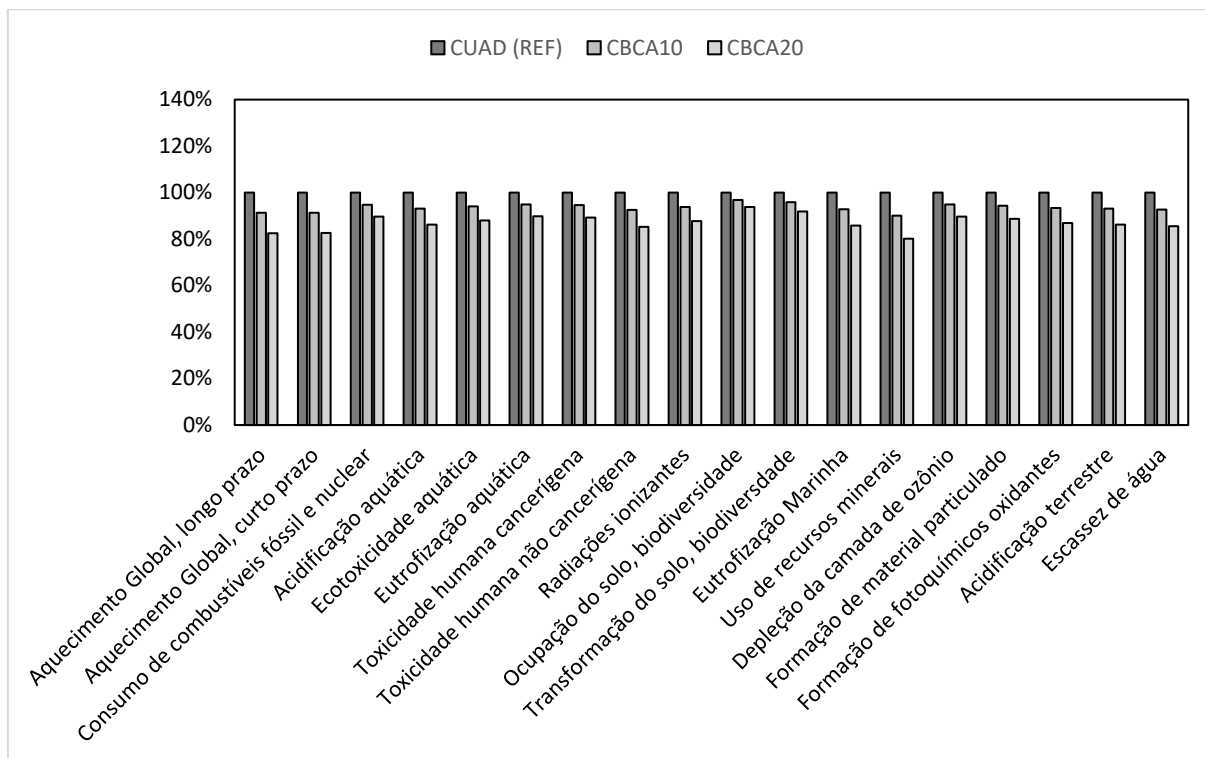
Embora tenha sido realizada queima em mufla da CBCA no trabalho para a retirada de resíduos orgânicos do material, foi considerado que, para a produção em grande escala do material na queima do bagaço da cana de açúcar, o processo em planta será mais eficiente e deixará menos resíduos orgânicos na CBCA, não sendo necessário pós-tratamento do material. Sendo assim, o processo de queima não foi levado em consideração no trabalho.

Figura 27 – ACV do CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CCA



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 28 – ACV do CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CBCA



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 27 – Impacto do diesel nos impactos ambientais do CUAD com CCA

Traço	Eutrofização aquática (kg PO4 P-lim eq)	Ocupação do solo (m2 de terra cultivável eq .yr)	Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)
CUAD	0,00148	5,16884	$3,39179 \times 10^{-5}$
CCA10	0,00175	5,97391	$3,90712 \times 10^{-5}$
CCA20	0,00202	6,77897	$4,42245 \times 10^{-5}$

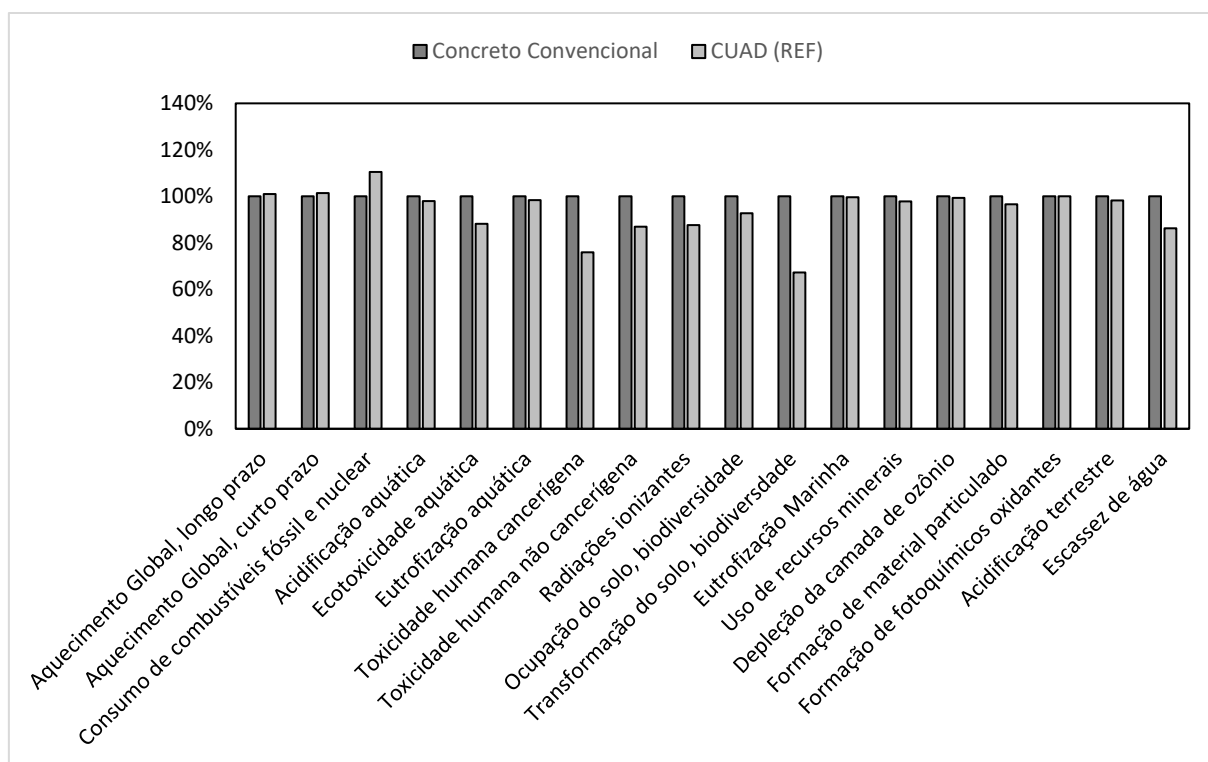
Fonte: Elaborado pelo autor

4.6.2 Avaliação do ciclo de vida das vigas protendidas

4.6.2.1 Cura convencional

A ACV para vigas de concreto protendido em concreto convencional ($f_{ck} = 30$ MPa) e CUAD foi realizada utilizando os resultados do dimensionamento das vigas de CUAD em concreto protendido. Os resultados são apresentados na Figura 33.

Figura 29 –ACV da viga protendida de CUAD produzida sob cura convencional



Fonte: Elaborado pelo Autor

As reduções do consumo de concreto e de aço para protensão e da armadura à flexão possibilitadas pelo CUAD resultaram em reduções nos impactos ambientais a ponto de igualdade destes aos do concreto convencional.

As categorias de Aquecimento Global a curto e longo prazo, com 1% de aumento, e consumo de combustíveis fósseis e nuclear, com 11% de aumento, foram as únicas categorias sem reduções.

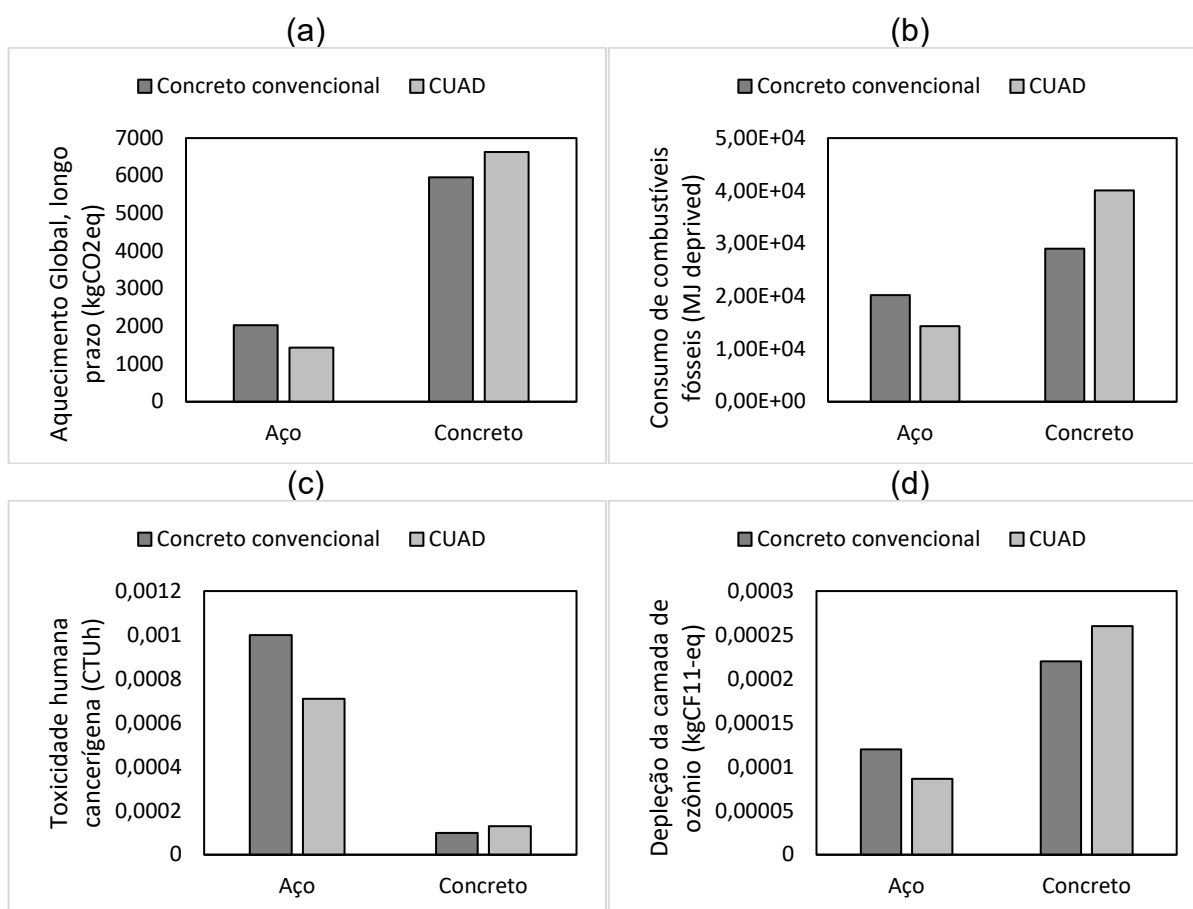
Analisando mais profundamente as categorias, foi possível identificar que, embora a viga protendida em CUAD possibilite a redução dos impactos ambientais, os impactos ambientais da produção do CUAD na viga (sem a consideração dos impactos do aço) continuam maiores que os impactos do concreto convencional.

Como observado nas análises da AICV por m³ de concreto, a produção do clínquer para o cimento é o maior contribuinte para os impactos ambientais do CUAD. Embora tenha sido possível reduzir a seção transversal da viga protendida em 47,6% com a utilização do CUAD, o consumo de cimento, previamente apresentado na Figura 23, é 11% maior na viga em CUAD que na convencional.

As Figuras 34 (a), (b), (c) e (d) apresentam os resultados dos impactos ambientais das vigas protendidas separados entre concreto e aço para as categorias (a) Aquecimento Global, longo prazo, (b) Consumo de combustíveis fósseis e nuclear, (c) Toxicidade humana cancerígena e (d) depleção da camada de ozônio.

Na viga protendida, os impactos ambientais do CUAD nas categorias estudadas continuam maiores que os impactos do concreto convencional, mesmo com a redução do consumo de concreto para sua produção. Esses resultados destacam a importância da consideração do impacto da maior resistência do concreto no consumo de aço na ACV.

Figura 30 – Impactos ambientais para as vigas protendidas: (a) Aquecimento Global a longo prazo, (b) consumo de combustíveis fósseis e nuclear, (c) toxicidade humana cancerígena e (d) depleção da camada de ozônio



Fonte: Elaborado pelo Autor

Analizando especificamente os fluxos responsáveis pelos valores nas categorias de impacto observadas na Figura 33, foi possível elaborar a Tabela 28 para identificar os fluxos e processos produtivos com maiores impactos na viga de CUAD.

Como esperado, em Aquecimento Global a longo prazo, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) no ar são causadas em grande parte pela produção do clínquer na fabricação do cimento. Tem-se a produção do clínquer também a grande responsável pelo consumo de combustíveis fósseis, com o processo de preparação de carvão mineral para utilização em fornos.

É importante ressaltar que nem sempre o fluxo com maior impacto nas emissões faz parte do processo com maior peso nos impactos ambientais do CUAD. Embora o fluxo com maior contribuição na depleção da camada de ozônio seja o bromometano (Halon 1301), fluxo originário da produção de fábricas de cimento, o processo produtivo com mais impactos ambientais no CUAD é o da produção de óleo combustível pesado.

Tabela 28 – Fluxos e processos com maior impacto nas categorias de impacto da viga protendida em CUAD

Categoria de impacto	Fluxo	Processo	Valor de emissão
Aquecimento Global, longo prazo	<i>Carbon dioxide, fossil, Emission to air, unspecified</i>	<i>clinker production clinker APOS,U</i>	5.975 kgCO ₂ eq
Consumo de combustíveis fósseis e nuclear	<i>Coal, hard, unspecified, in ground, Resource, in ground</i>	<i>hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal APOS,U</i>	26.345 MJ deprived
Toxicidade humana cancerígena	<i>Chromium VI, Emission to water, ground water, long-term</i>	<i>hard coal mine operation and hard coal preparation hard coal APOS,U</i>	6,19E-04 CTuh
Depleção da camada de ozônio	<i>Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301, Emission to air</i>	<i>treatment of copper scrap by electrolytic refining copper APOS,U</i>	2,81E-04 kg CFC-11 eq

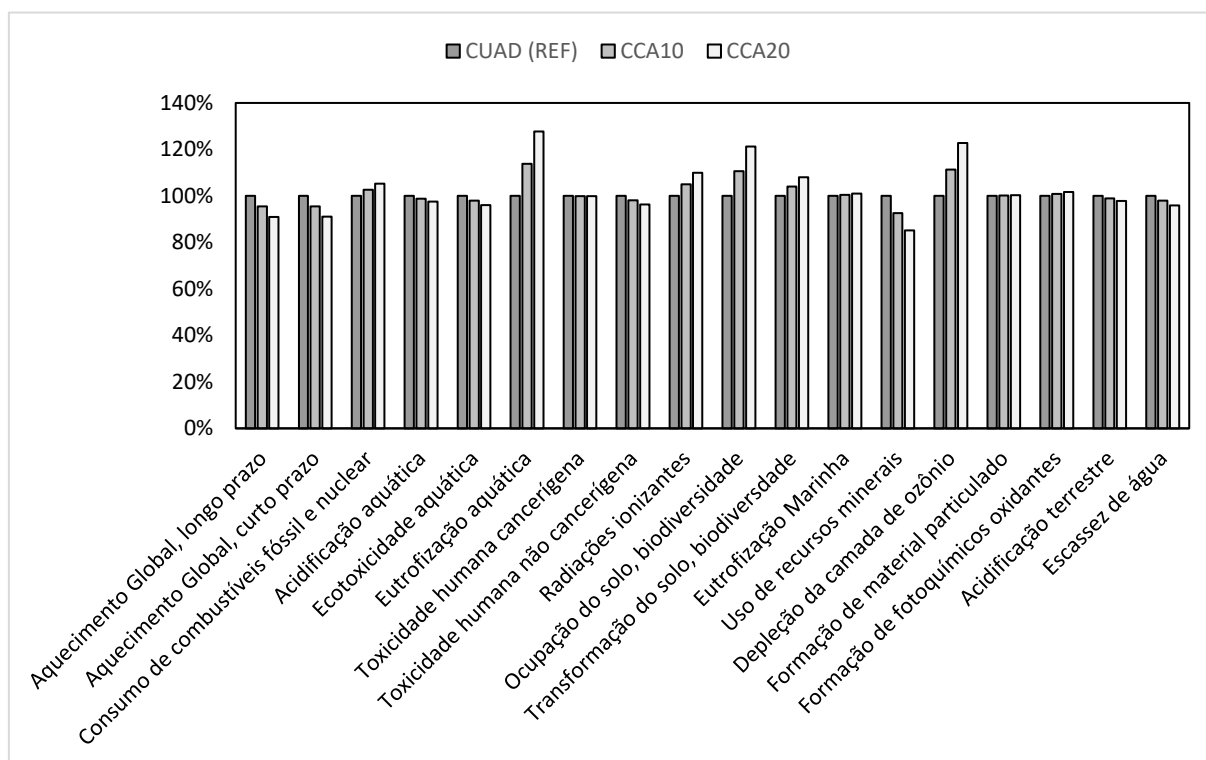
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.2.2 Vigas protendidas de CUAD com cinzas de casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar

Foi realizada a ACV de vigas protendidas produzidas em CUAD com substituição parcial de cimento por cinzas de casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar em 10% e 20%.

A análise dos resultados da ACV da viga protendida de CUAD com substituição de cimento por cinza de casca de arroz (Figura 35) indica que o material, apesar de possibilitar o aumento da resistência do CUAD para 10% de substituição e manutenção da resistência para 20% de substituição, não é tão vantajosa num ponto de vista sustentável para as condições apresentadas no estudo.

Figura 31 – ACV da viga protendida de CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CCA



Fonte: Elaborado pelo Autor

Embora pareça contraditório, a inclusão da cinza de casca de arroz em substituição ao cimento reduziu impactos de aquecimento global a longo e curto prazo, mas aumentou impactos de consumo de combustíveis fósseis e nuclear. Por ser um resíduo e, portanto, ter impactos ambientais apenas de transporte ao substituir o cimento, que é um material com grande emissão de CO_2 e baixa distância de transporte, a cinza de casca de arroz compensa em boa parte os impactos de aquecimento global.

A categoria de aquecimento global, que em teoria deveria ter reduções proporcionais à taxa de substituição de cimento, teve reduções de 4% para a inclusão de 10% de cinza de casca de arroz e 9% para a substituição de cimento por 20% da cinza. Nessa diferença entre o esperado e o obtido em emissões em CO_2eq é possível quantificar o impacto do transporte no ciclo de vida do CUAD produzido com a cinza de casca de arroz.

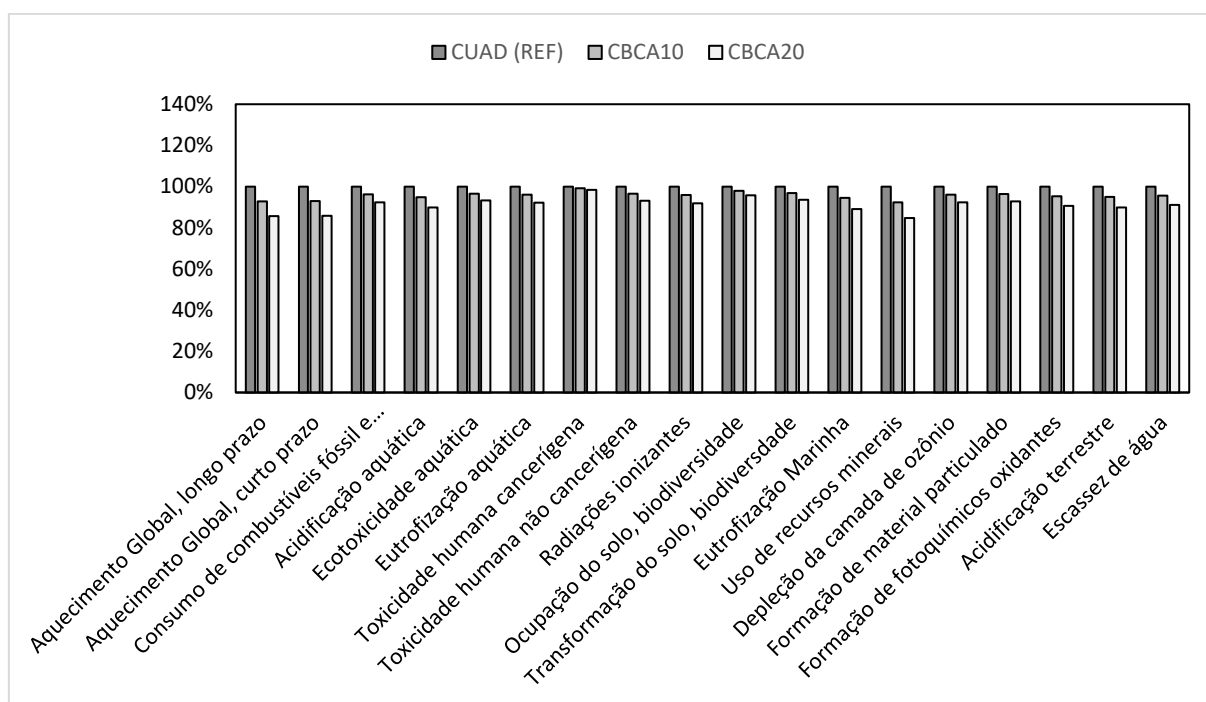
Ao contrário da cinza de casca de arroz, a cinza do bagaço da cana de açúcar indica bons resultados e viabilidade de utilização do material para a redução dos impactos ambientais de vigas produzidas com CUAD. Embora o efeito do material nas propriedades mecânicas do CUAD não seja positivo, as reduções nas propriedades

mecânicas não foram o suficiente para que fosse necessário um dimensionamento diferente das vigas em CUAD. Os resultados da ACV para a viga protendida de CUAD com cinza do bagaço da cana de açúcar são apresentados na Figura 36.

Os melhores resultados obtidos na ACV foram para o CUAD produzido com cinza do bagaço da cana de açúcar. Apesar de ter os menores resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade entre todos os traços de CUAD produzidos, o potencial de redução dos impactos ambientais e uma distância de transporte menor que a da cinza de casca de arroz contribuíram para que os impactos fossem reduzidos.

Para a condição estudada, portanto, a sensibilidade dos resultados está mais ligada às distâncias de transporte que ao tipo de cinza, pois não houve variação nos resultados de dimensionamento.

Figura 32 – ACV da viga protendida de CUAD produzido com substituição parcial de cimento por CBCA

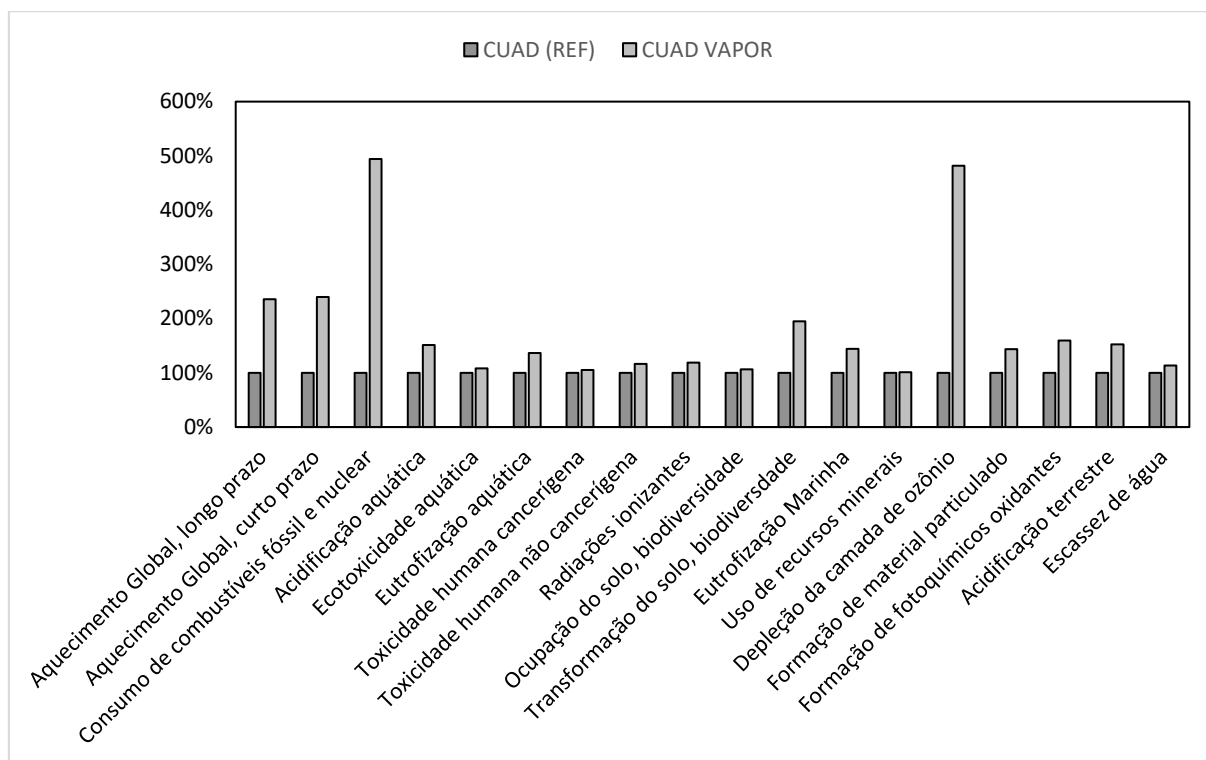


Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.2.3 Cura convencional vs cura a vapor

Uma ACV comparativa entre os impactos ambientais de vigas protendidas produzidas com CUADs submetidos às curas convencional e a vapor foi realizada. Os resultados são apresentados na Figura 37.

Figura 33 - ACV comparativa de vigas de CUAD submetidas aos regimes de cura convencional e a vapor



Fonte: Elaborado pelo Autor

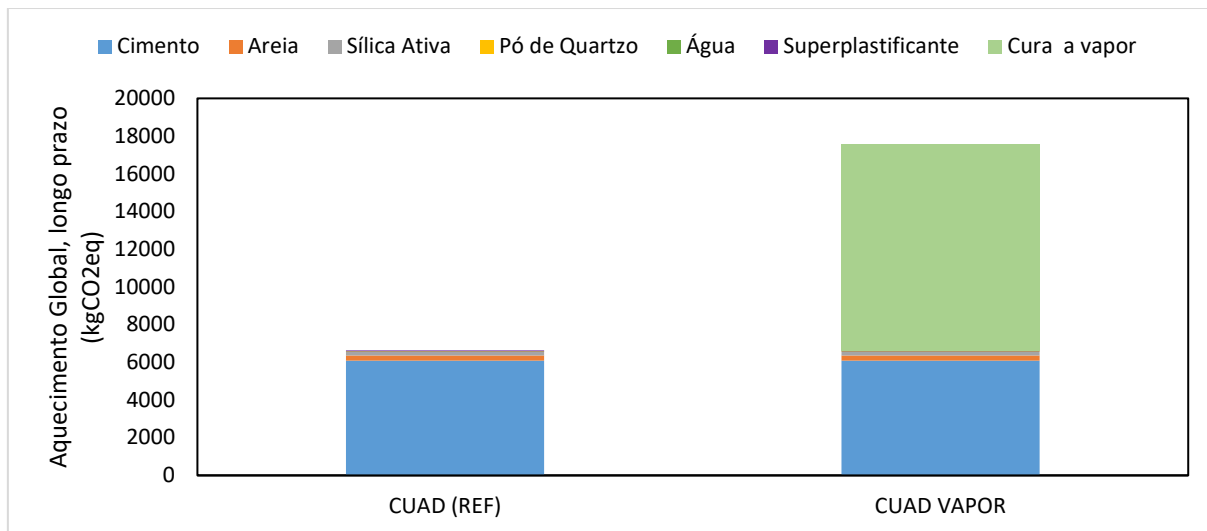
A cura a vapor do sistema escolhido para a viga em CUAD é realizada por sistema com equipamento de 1000 KW com combustão de gás natural. A queima do gás natural no funcionamento do equipamento de cura a vapor resultou em picos nas categorias de Aquecimento Global a curto e longo prazo (140% de aumento), consumo de combustíveis fósseis (394% de aumento) e depleção da camada de ozônio (382% de aumento).

Nas Figuras 38 a 40 é possível observar as contribuições da cura a vapor nas categorias de impacto citadas. O cimento, grande responsável pelas emissões do CUAD em comparações por m³ e na viga protendida em cura convencional, passa a figurar como maior contribuinte nas emissões da viga protendida.

Na presente pesquisa, por não haver ganho de desempenho mecânico no CUAD com a cura a vapor, o aumento dos impactos ambientais não justifica a utilização da cura a vapor no material. Entretanto, métodos de cura a vapor desenvolvidos na literatura para CUADs e concretos de pós reativos resultaram em aumento das propriedades mecânicas, o que pode potencializar a redução do consumo de materiais na produção da viga protendida e compensar os impactos ambientais do sistema de

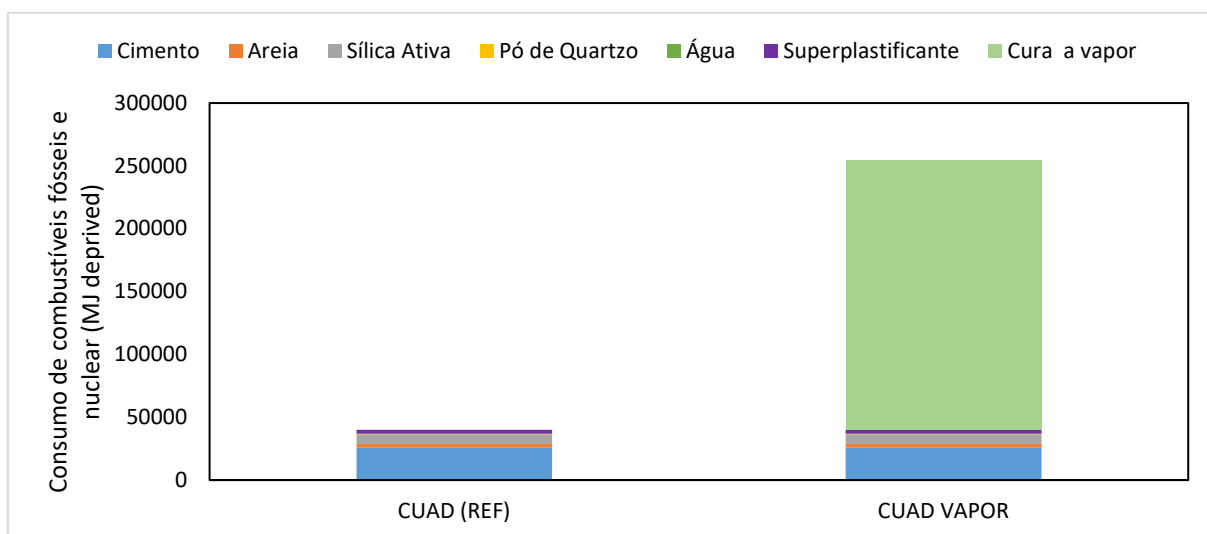
cura (HIREMATH; YARAGAL, 2016; VIGNESHWARI; ARUNACHALAM; ANGAYARKANNI, 2018).

Figura 34 – Contribuição da cura a vapor no Aquecimento Global a longo prazo nas vigas em CUAD



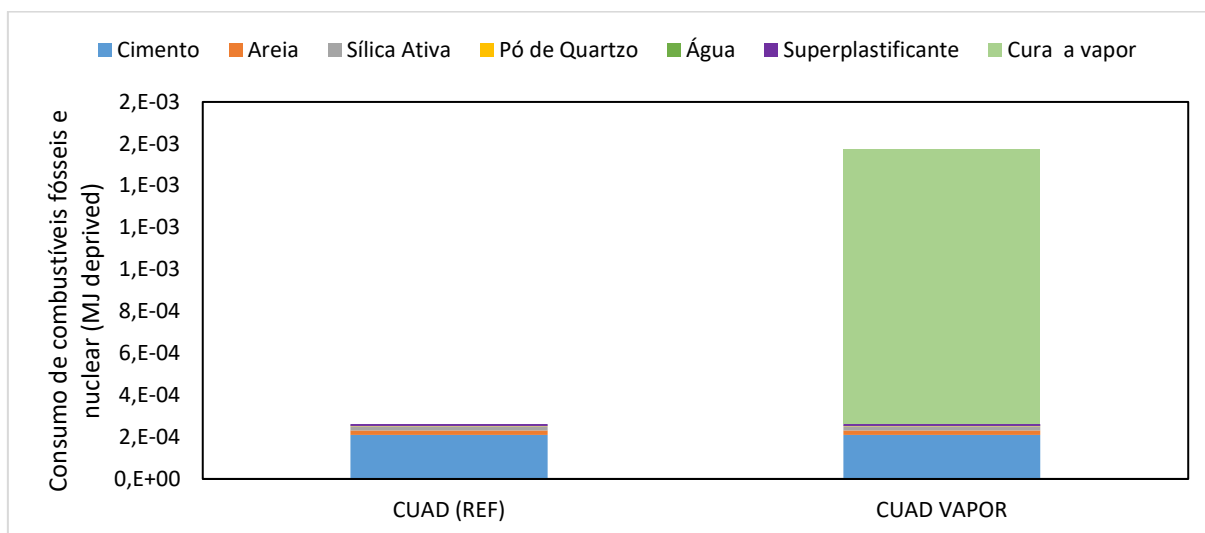
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 35 - Contribuição da cura a vapor no Consumo de combustíveis fósseis e nuclear nas vigas em CUAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 36 - Contribuição da cura a vapor na Depleção da Camada de Ozônio nas vigas em CUAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.3 Análise de sensibilidade da ACV realizada

Foi realizada a análise de sensibilidade da ACV para avaliar a robustez do modelo criado. Para isso, duas alternativas foram definidas:

- Caso 1: A realização da ACV da viga pretendida com a metodologia AICV Recipe;
- Caso 2: A realização da ACV do CUAD por m³ e da viga pretendida considerando a sílica ativa como resíduo da produção de ferro silício, sem alocação dos impactos ambientais.

4.6.3.1 Caso 1: ACV com a metodologia Recipe 2016 Midpoint (H)

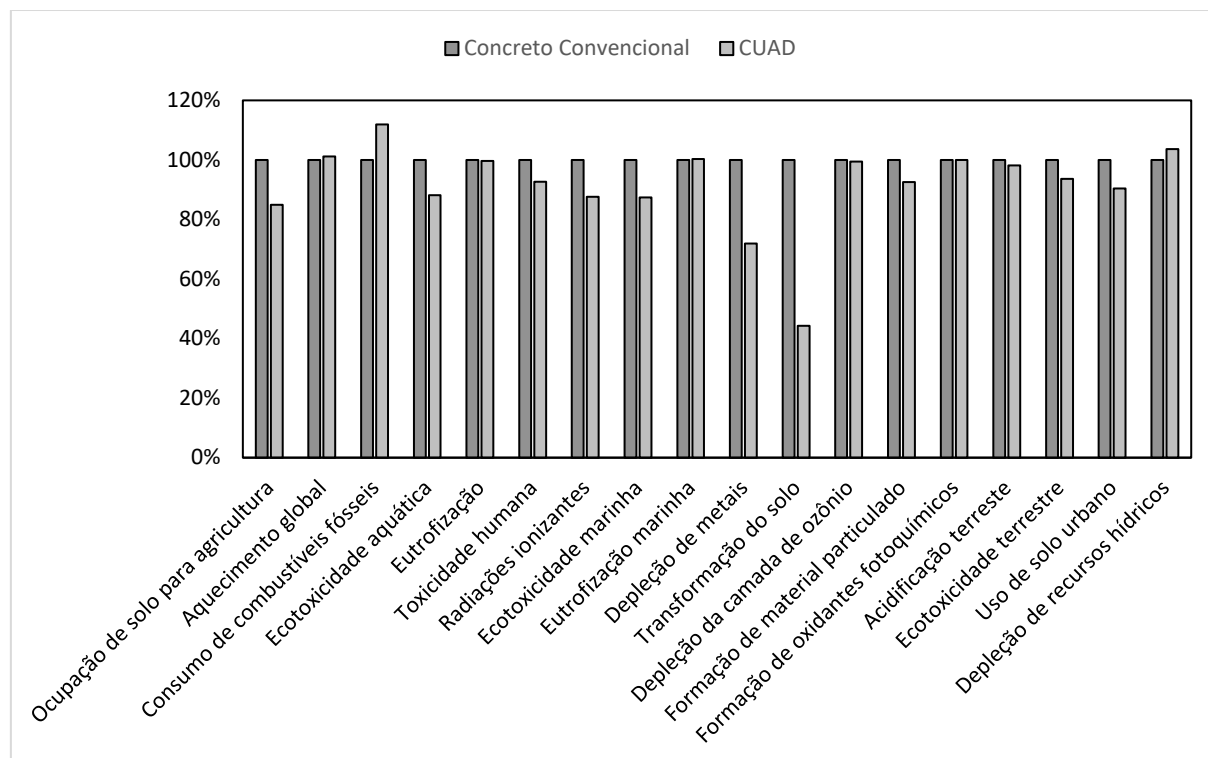
No Caso 1 foi realizada uma ACV com a metodologia AICV Recipe. Os resultados são apresentados na Figura 41.

Os resultados da ACV com a metodologia AICV Recipe 2016 *midpoint* (H) mantiveram a tendência dos resultados obtidos na metodologia *Impact World+*. As categorias de impacto presentes na metodologia foram reduzidas na produção da viga pretendida em CUAD em relação à viga em concreto convencional.

A análise de sensibilidade no Caso 1, entretanto, possibilitou identificar um ponto de divergência entre as duas metodologias: a depleção de recursos hídricos/escassez de água. A diferença nos resultados pode ser devida aos fatores de caracterização das duas metodologias, dando diferentes pesos para importantes fluxos na determinação de impactos ambientais referentes ao consumo de recursos hídricos. A

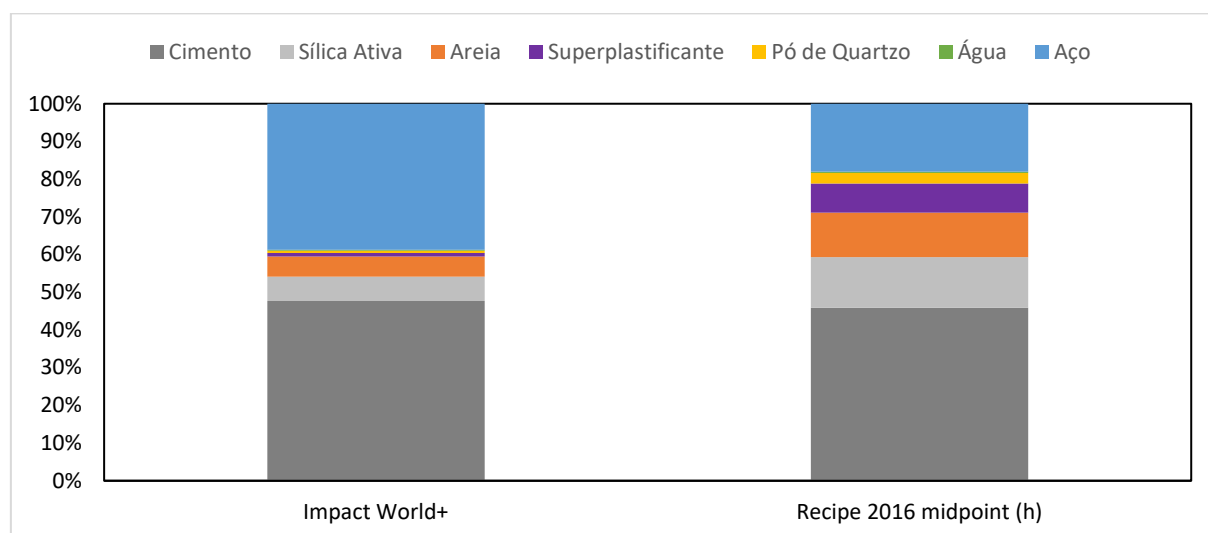
Figura 42 apresenta os impactos dos materiais no consumo de recursos hídricos nas duas metodologias AICV adotadas.

Figura 37 – ACV realizada com a metodologia AICV Recipe 2016 *midpoint* (H)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 38 – Contribuições dos materiais da viga protendida em CUAD no consumo de recursos hídricos nas categorias Impact World+ e Recipe 2016 *midpoint* (H)



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.3.2 Caso 2: ACV do CUAD com a sílica ativa como resíduo da produção do ferro silício

A ACV realizada no Caso 2 considerou a sílica ativa como resíduo da produção do ferro silício. Sendo assim, foram considerados apenas impactos ambientais de transporte do material. A Figura 43 apresenta os resultados da ACV para o Caso 2.

A consideração da sílica como coproduto ou resíduo pode impactar consideravelmente os resultados da ACV. Todas as categorias de impacto da metodologia AICV *Impact World+* sofreram reduções.

Consumo de combustíveis fósseis e nuclear, toxicidade humana cancerígena e formação de material particulado foram as com reduções mais expressivas, de 17%, 26% e 17%, respectivamente.

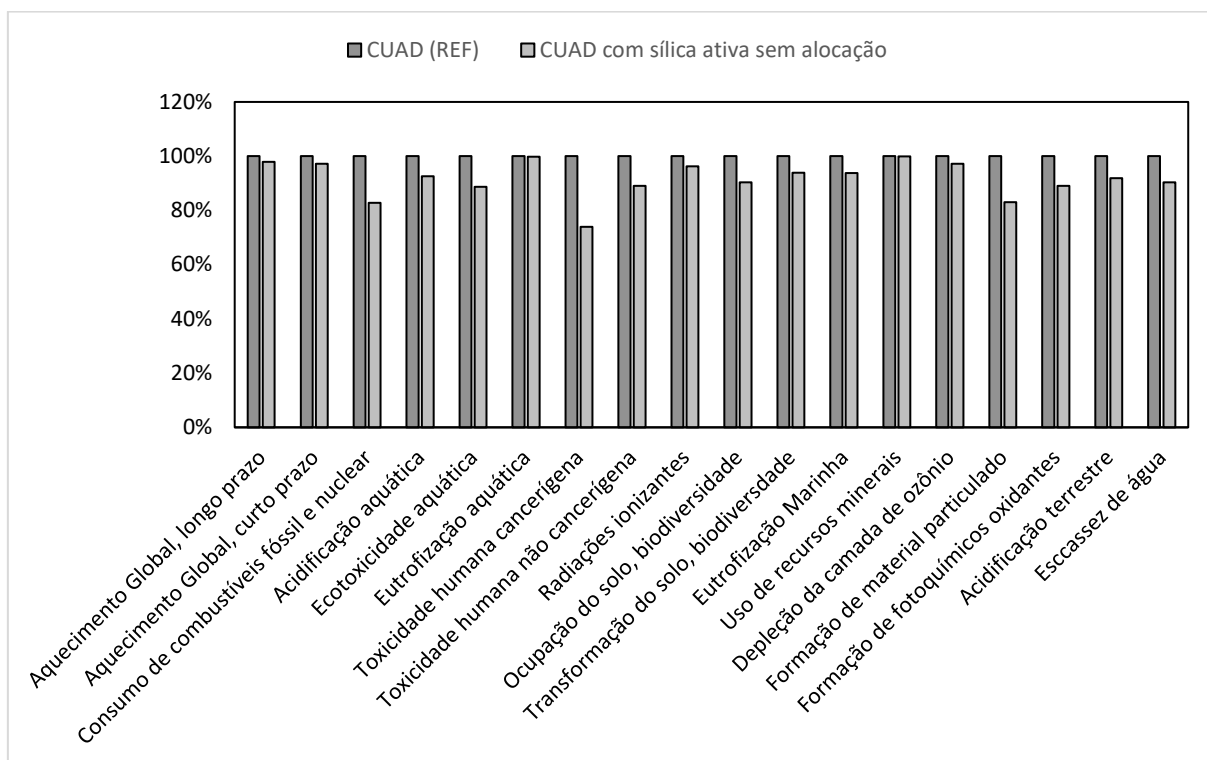
Os resultados da análise de sensibilidade indicam a importância da definição da sílica ativa como resíduo ou coproduto na consideração dos impactos ambientais. Diferentes considerações nos valores de entrada podem levar a diferentes conclusões na ACV.

A diferença potencial dos resultados pela consideração da sílica ativa com ou sem alocação é observada na produção da viga protendida em CUAD. A viga em CUAD com a sílica ativa sem alocação, quando comparada com as vigas em concreto convencional e CUAD referência, se torna indiscutivelmente a opção mais vantajosa em termos de impactos ambientais. São observadas reduções em todas as categorias de impacto avaliadas. Os resultados são apresentados na Figura 44.

Com a análise mais aprofundada de algumas categorias de impacto (Figura 45) é possível entender melhor as reduções dos impactos no CUAD com a ausência da alocação dos impactos ambientais do ferro silício na sílica ativa.

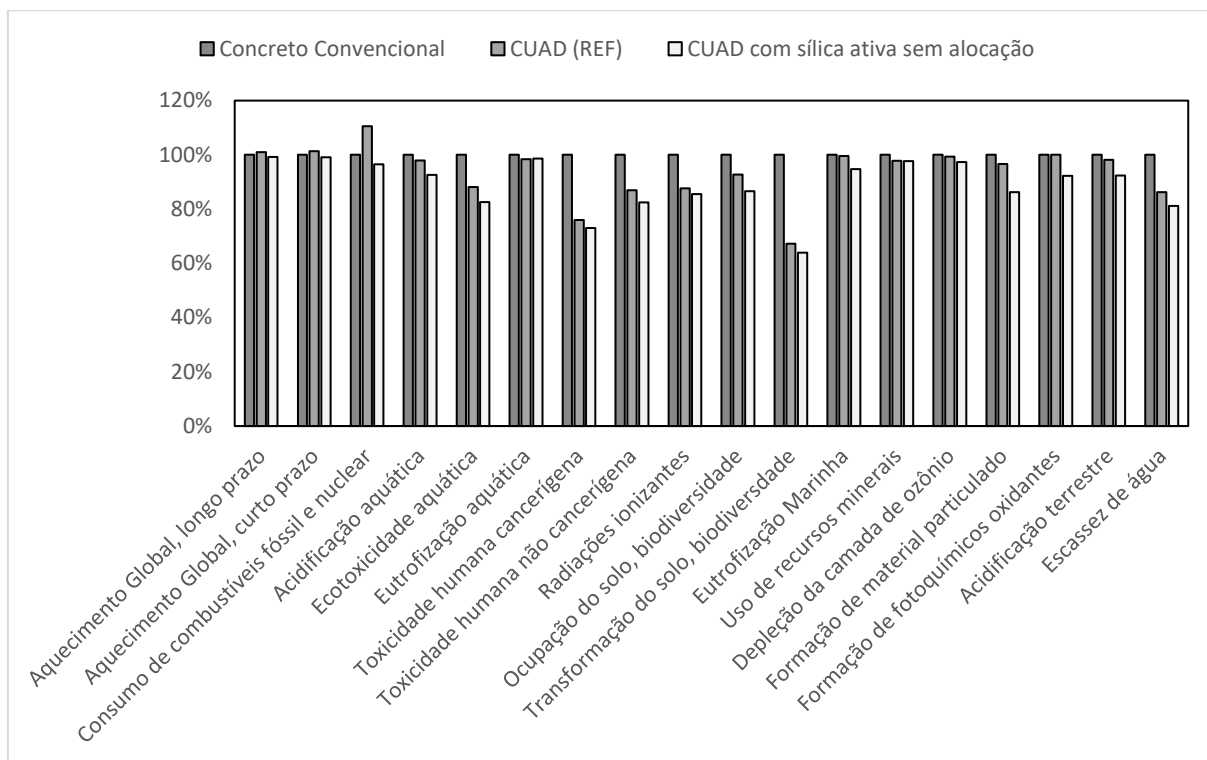
Como visto no capítulo 4.5, os impactos da sílica ativa são devidos, principalmente, à combustão do carvão mineral na produção do ferro silício. Nas categorias de impacto de aquecimento global a longo prazo, consumo de combustíveis fósseis e nuclear e toxicidade humana os impactos da queima do carvão mineral têm um peso maior sobre o total do CUAD.

Figura 39 – ACV realizada do CUAD com sílica ativa como resíduo



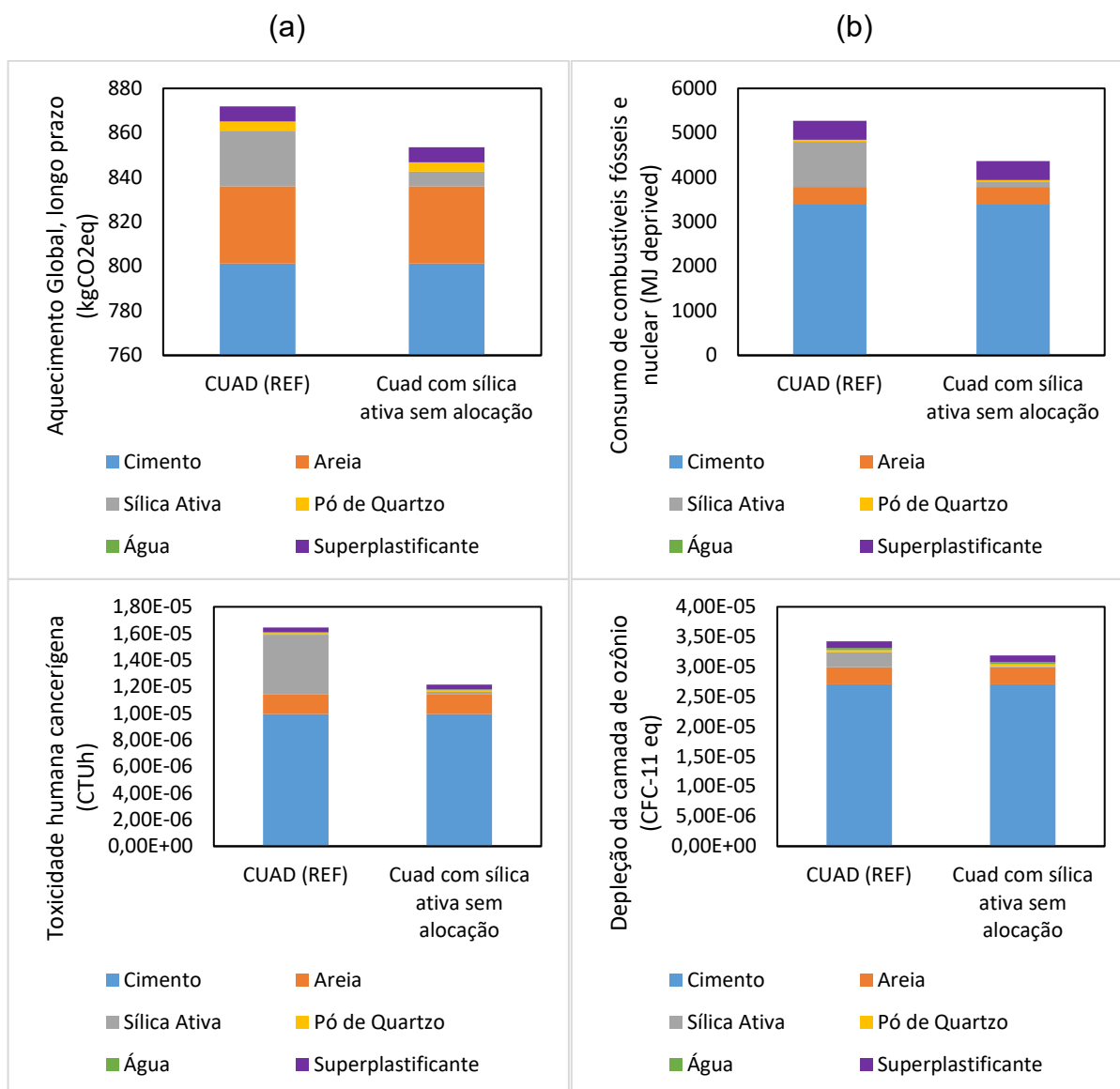
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 40 – ACV da viga protendida em CUAD com a consideração da sílica ativa como rejeito



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 41 – Resultados da AICV para o CUAD com a sílica ativa sem alocação: (a) Aquecimento Global, longo prazo, (b) Consumo de combustíveis fósseis e nuclear, (c) Toxicidade humana cancerígena e (d) Depleção da camada de ozônio



5 CONCLUSÕES

Para a realização do estudo sobre a viabilidade do CUAD como material de construção sustentável, foi necessário dividir a pesquisa em três etapas:

- Experimental, com a caracterização dos materiais, definição dos traços, produção dos corpos de prova e estudo das propriedades mecânicas do CUAD;
- Dimensionamento, com o dimensionamento de uma viga protendida baseada num projeto real de ponte para obtenção dos consumos de concreto e aço;
- Avaliação do ciclo de vida, com as definições de objetivo e escopo, levantamento do inventário do ciclo de vida e realização e interpretação dos resultados AICV.

Foram realizadas avaliações do ciclo de vida em comparações em diferentes situações:

- Comparação com o concreto convencional por metro cúbico de concreto;
- Comparação com o concreto convencional por unidade de viga protendida produzida;
- A substituição parcial de cimento por cinzas de casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar;
- A produção do concreto sob regimes de cura convencional e a vapor.

Para a realização do estudo, corpos de prova do material foram desenvolvidos em laboratório e propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade foram investigadas. Com resultados de propriedades mecânicas foi possível entrar com valores de consumo de concreto e aço e a realização da avaliação do ciclo de vida comparativa.

A análise dos resultados do estudo indica que, a princípio, o CUAD é um material que gera mais impactos ambientais que o concreto convencional. Isso é devido principalmente ao alto consumo de cimento no traço do CUAD (891 kg/m³).

Entretanto, ao realizar as comparações levando em conta as melhores resistências à compressão, tração e módulo de elasticidade do CUAD, é possível observar uma vantagem do material em seu “custo ambiental” por MPa de concreto. A análise da produção da viga protendida em CUAD confirmou a indicação de vantagens da utilização do CUAD pelas reduções do consumo de concreto e aço na construção.

Mesmo com resultados positivos na análise comparativa por peça de viga produzida e a redução dos impactos ambientais do CUAD, o consumo do cimento é aumentado em 11,2% com a utilização do CUAD.

Para compensar o aumento do consumo de cimento na indústria cimenteira, a utilização de materiais em substituição ao cimento, que não resultem no aumento do consumo de concreto ou de aço na estrutura, serão essenciais para o desenvolvimento do CUAD.

No caso desses materiais cimentícios suplementares, cinza da casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar foram utilizados como substituição de cimento em taxas de 10 e 20%. A utilização da cinza da casca de arroz resultou em melhorias nas propriedades mecânicas dos materiais em relação à cinza do bagaço da cana de açúcar, porém as diferenças não causaram alterações no dimensionamento da viga protendida.

Muitos estudos atualmente são feitos com o foco na produção sustentável do CUAD, seja pela otimização da utilização dos materiais ou pela substituição de cimento por materiais alternativos. Estes estudos focam na diminuição de emissões CO₂, que são indicativo de impactos de aquecimento global.

No caso do presente estudo, a utilização de CCA e CBCA reduziu impactos relacionados ao impacto de aquecimento global, mas resultados de outras categorias de impacto precisam também ser levados em conta.

A utilização da CCA proporcionou uma redução dos valores médios de resistência à compressão de 4%, quando utilizada em substituição a 10% de cimento e 9%, quando utilizada em substituição a 20% de cimento. Entretanto, categorias também importantes de impactos ambientais como consumo de combustíveis fósseis e depleção da camada de ozônio sofreram aumentos de 14% e 28% para as duas taxas de substituição adotadas na pesquisa.

A cinza do bagaço da cana de açúcar, apesar de não melhorar muito as propriedades mecânicas do CUAD, possibilitou o dimensionamento de vigas sem alterações nas seções transversais da viga protendida em CUAD e reduziu todas as categorias de impacto avaliadas na metodologia AICV *Impact World* +.

A diferença dos resultados entre as cinzas foi causada pelas distâncias de transporte dos materiais. A ACV foi realizada com abrangência geográfica para a cidade de Belo Horizonte e, sendo assim, a cinza do bagaço da cana de açúcar

precisou ser transportada por uma distância equivalente a 11% da cinza da casca de arroz.

A substituição de cimento por materiais alternativos, portanto, pode ser positiva na produção do CUAD, porém impactos ambientais do transporte dos materiais precisam ser levados em consideração. A escolha dos materiais para a produção do CUAD deve ser influenciada não apenas por seu papel no desenvolvimento das propriedades mecânicas, mas também pela sua disponibilidade na região de produção.

Por fim, diferentes regimes de cura foram estudados na pesquisa. A cura vapor não resultou em melhoria das propriedades mecânicas do CUAD, porém foi possível manter o detalhamento da viga pretendida do CUAD referência.

A cura a vapor resultou em aumentos dos impactos ambientais de 542% de consumo de combustíveis fósseis, 682% de radiações ionizantes e 1209% de depleção da camada de ozônio. Mesmo que a cura a vapor resultasse em melhores propriedades mecânicas, condições de normas quanto à área da seção transversal da viga e ao consumo de aço limitariam o potencial de reduções do consumo de concreto e aço nas vigas pretendidas em CUAD. Sendo assim, os resultados da pesquisa sugerem que uma produção sustentável de CUAD deve ser feita evitando a utilização de cura a vapor ou outros métodos de cura térmica presentes na literatura.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados e nas conclusões apresentadas no trabalho, são sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- A realização da ACV considerando a vida útil prolongada do CUAD em relação ao concreto convencional;
- A ACV comparativa da produção de vigas em CUAD reforçado por fibras e vigas em concreto convencional pretendido;
- A elaboração de um inventário do ciclo de vida detalhado para CCA e CBCA, estudando desde a produção do arroz e da cana de açúcar, para a consideração das cinzas como coproduto;
- A produção de CUADs e a ACV do material com substituição por materiais que possibilitem maiores reduções do consumo de cimento;
- A produção otimizada do CUAD, buscando a melhor eficiência de materiais e diminuir vários impactos ambientais causados pelo material, não apenas emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, O. M. et al. Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 235–246, 2018.
- ABID, M. et al. **High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 30 ago. 2017.
- ABNT. **NBT 13279 - Argamassa para assentament e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**, 2005.
- ABNT. **NBT 7188 - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**, 2013.
- ABNT. **ISO 14040:2006 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Principios e estrutura**, 2014.
- ABNT. **NBR 8522 - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**, 2017.
- ACERO, A. P.; RODRIGUEZ, C.; CIROTH, A. LCIA methods: Impact assessment methods in life cycle assessment and their impact categories. Version 1.5.6. **Green Delta**, n. February 2014, p. 1–23, 2015.
- ALKAYSI, M. et al. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, v. 66, p. 47–56, 2016.
- ALKAYSI, M.; EL-TAWIL, S. Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 10, p. 4185–4200, 29 out. 2016.
- ANDREASEN, A. H. M. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, n. 3, p. 217–228, mar. 1930.
- ARORA, A. et al. Fundamental insights into the compressive and flexural response of binder- and aggregate-optimized ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Composites**, v. 98, n. April, p. 1–13, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217 Agregados - Determinação da composição granulométrica**, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.
- BAHEDH, M. A.; JAAFAR, M. S. Ultra high-performance concrete utilizing fly ash as cement replacement under autoclaving technique. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, p. e00202, 2018.

BARE, J. C. et al. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, n. 6, p. 319–326, 2000.

BRASIL. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.,.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2116–2136, 2005.

BULLE, C. et al. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 9, p. 1653–1674, 2019.

CAMILETTI, J.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 46, n. 6, p. 881–898, 5 jun. 2013.

CHEN, T.; GAO, X.; REN, M. Effects of autoclave curing and fly ash on mechanical properties of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 864–872, jan. 2018.

CHEN, Y. et al. Evaluation and optimization of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) subjected to harsh ocean environment: Towards an application of Layered Double Hydroxides (LDHs). **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 51–62, 2018.

CRESPO MENDES, N. et al. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos Palavras-chave. **Production**, n. x, 2013.

DA COSTA, B. L. de C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**, 2012.

DONG, Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 414–425, 2018.

Ecoinvent. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/>>.

EFCA. **EFCA ENVIRONMENTAL DECLARATION - SUPERPLASTICIZING ADMIXTURES**. [s.l: s.n.].

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**. [s.l: s.n.].

GHAFAARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E. Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 17–25, 2015.

GOOGLE. **Google Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 21 out. 2020.

GRAYBEAL, B. Ultra-High Performance Concrete. **Research, Development, and**

Technology Turner-Fairbank Highway Research Center., v. FHWA Publi, p. 8, 2011.

GU, C. et al. Effect of curing conditions on the durability of ultra-high performance concrete under flexural load. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 31, n. 2, p. 278–285, 13 abr. 2016.

GU, C.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. **Science China Technological Sciences**, v. 58, n. 4, p. 587–599, 30 abr. 2015.

HABERT, G. et al. Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 38, p. 1–11, abr. 2013.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 154, n. October, p. 72–87, 2017.

HIREMATH, P.; YARAGAL, S. C. Investigation on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete under Different Curing Regimes. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 9, p. 9758–9762, 2016.

HUANG, H. et al. Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 621–628, 2017.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 2017.

HÜSKEN, G. **A multifunctional design approach for sustainable concrete - With Application to Concrete Mass Products**. 2010. 263p. PhD Thesis—Eindhoven University of Technology, Eindhoven.

ISO. **ISO 14040 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**, 2006.

JØRGENSEN, S. E.; FATH, B. D. **Encyclopedia of ecology**. 1. ed. Elsevier Science,.

JRC. **International reference Life Cycle Data system (ILCD) handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance** International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook -- General guide for Life Cycle Assessment -- Detailed guidance Luxembourg Publications Office of the European Union, , 2010. Disponível em: <<http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf>>

JUNIOR, S. D. C. **SECC**, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.tqs.com.br/apps/secc/lzk6uydlyx>>

JUSTS, J.; SHAKHMENKO, G.; BAJARE, D. Effect of different mix compositions and curing regimes on ultra high performance concrete compressive strength. **10th**

International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, n. January 2010, p. 112–116, 2010.

KHALOO, A. R. A New Mixture Design Method for Ultra-High-Strength Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 2, p. 215–224, 2017.

KIM, H.; KOH, T.; PYO, S. Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 153–160, 2016.

KRISHNA, I. V. M.; MANICKAM, V. **Environmental management: science and engineering for industry**. [s.l: s.n.].

KUMAR, S. V.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. **Indian Concrete Journal**, v. 77, n. 9, p. 1324–1331, 2003.

LARSEN, I. L. et al. Determining the Environmental Benefits of Ultra High Performance Concrete as a Bridge Construction Material. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 245, n. 5, 2017.

LUCON O., D. et al. Buildings. In: **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC,. p. 671–738.

MATTHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C. T.; MATTHEWS, D. H. **Life Cycle Assessment: Quantitative approaches for decisions that matter**. 1. ed. Open access textbook,.

MAZANEC, O. et al. Mixing of high performance concrete: Effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 43, n. 3, p. 357–365, 18 abr. 2010.

MEHTA, P. K. Global Concrete Industry Sustainability. **Concrete International**, v. 31, n. 2, p. 45–58, 2009.

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L.; REIS, P. J. Effects of nano-silica on mechanical performance and microstructure of ultra-high performance concrete. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 387–394, 2017.

MENG, W.; VALIPOUR, M.; KHAYAT, K. H. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 1, p. 29, 10 fev. 2017.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probabilisty for Engineers**. 4^a ed. Wiley,.

MOSABERPANAH, M. A.; EREN, O. CO₂-full factorial optimization of an ultra-high performance concrete mix design. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 450–463, 3 abr. 2018.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILHENA, A. **Avaliação do cilco de vida:**

princípios e aplicações. CETA/CEMPRE,.

NASR, M. S. et al. Utilization of High Volume Fraction of Binary Combinations of Supplementary Cementitious Materials in the Production of Reactive Powder Concrete. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, p. 1–9, 2020.

NBR. **6118:2014 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento** ABNT, 2014.

POLARMATIC. **maxTURBOMATIC (“MAX”)**. Disponível em: <<https://www.polarmatic.com/en/products-and-services/curing-products/maxturbomatic-2/>>. Acesso em: 3 nov. 2020.

PREM, P. R.; BHARATKUMAR, B. H.; IYER, N. R. Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. **Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences**, v. 38, n. 6, p. 1421–1431, 2013.

QUEIROZ, I. S. D. O. **Desenvolvimento de Concretos de Ultra-Alta Resistência com uso de materiais disponíveis na região do norte de Minas Gerais**. 2018. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RAJASEKAR, A. et al. Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 350–356, 2018.

RANDL, N. et al. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. **Construction and Building Materials**, v. 67, n. PART C, p. 373–378, 2014.

SAMEER, H. et al. Environmental Assessment of Ultra-High-Performance Concrete Using Carbon, Material, and Water Footprint. **Materials**, v. 12, n. 6, p. 851, 2019.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2016.

SHI, C. et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741–751, 2015.

SIDDIQUE, R.; CHAHAL, N. Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 8, p. 739–744, 2011.

SILVA, L. C. **AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR CINZAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E DA CASCA DE ARROZ**. 2015. 132p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil)—Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 600–612, 2016.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap. **Construction and Building Materials**, v. 139,

p. 374–383, 2017a.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Using Particle Packing and Statistical Approach to Optimize Eco-Efficient Ultra-High-Performance Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 6, p. 847–858, dez. 2017b.

STENGEL, T.; SCHIESSL, P. Life cycle assessment (LCA) of ultra high performance concrete (UHPC) structures. In: **Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies**. Woodhead Publishing Limited, p. 528–564.

STRANDDORF, K. et al. Impact categories, normalisation and weighting in LCA. **Environmental News**, v. 78, p. 90, 2005.

THE INTERNATIONAL STANDARDS ORGANISATION (ISO). **ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006.

TIMM, J. F. G.; MORALES, M. F. D.; PASSUELLO, A. Sensitivity Analysis of Life Cycle Impacts Distribution Methods Choice Applied to Silica Fume Production. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, n. 1, 2019.

TUTIKIAN, B. F.; CARPENA, D.; MOLIN, D. **Concreto Auto-Adensável**. PINI,.

VAN TUAN, N. et al. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 2030–2035, 2011.

VIANA, T. M. et al. **Propriedades de mistura de concreto de ultra-alto desempenho feitas com a teoria de empacotamento de partículas e com incorporação de nanotubos de carbono**. 2018

VIANA, T. M. **Avaliação do comportamento de Concretos de Pós Reativos com incorporação de nanotubos de carbono de paredes múltiplas frente a elevadas temperaturas**. 2019. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais,

VIANA, T. M. et al. Behaviour of ultra-high performance concretes incorporating carbon nanotubes under thermal load. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120556, 2020.

VIGNESHWARI, M.; ARUNACHALAM, K.; ANGAYARKANNI, A. Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 264–277, 2018.

WU, D.; SOFI, M.; MENDIS, P. HIGH STRENGTH CONCRETE FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION. **International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE-2010)**, n. December, p. 434–442, 2010.

YU, R. et al. Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 220–233, 2017.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 56, n. November, p. 29–39, 10 fev. 2014.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 383–394, 2015.

ZBICIŃSKI, I. et al. **Product Design and Life Cycle Assessment**. Baltic University Press,.

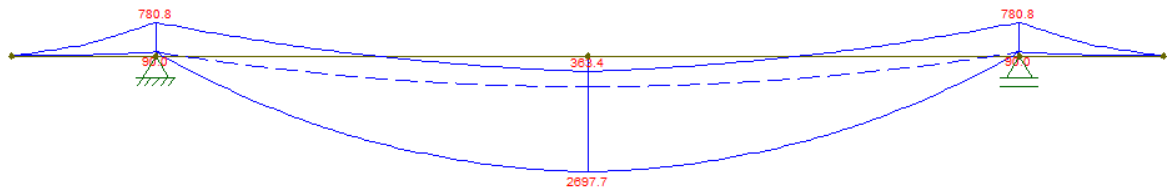
ZHANG, H. et al. Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 469–482, 2019.

ZHANG, J.; ZHAO, Y. The mechanical properties and microstructure of ultra-high-performance concrete containing various supplementary cementitious materials. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 6, n. 4, p. 254–266, 4 jul. 2017.

ZHONG, R.; WILLE, K.; VIEGAS, R. Material efficiency in the design of UHPC paste from a life cycle point of view. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 505–513, 2018.

Diagramas de Esforços

Figura 43 – Diagrama de Momento fletor em kNm



Propriedades da seção transversal

Time (hours)	Number of people
-20	0
-18	10
-16	20
-14	140
-12	135
-10	140
-8	150
-6	160
-4	25
-2	140
0	140
2	25
4	140
6	145
8	140
10	145

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 29 – Propriedades da seção transversal

Propriedade	Valor
Área	3038 cm ²
Momento de Inércia (m ⁴)	0,285 m ⁴
Ws (m ³)	0,687 m ³
Wi (m ³)	0,218 m ³

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tensões na viga

Tabela 30 – Tensões devidas aos diversos carregamentos

Esforço	Tensões	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
go	σ_i (kN/m ²)	0,0 0	1.436, 29	2.721, 38	3.855, 29	4.838, 02	5.669, 55	6.349, 90	6.879, 05	7.257, 02	7.483, 81	7.559, 40
	σ_s (kN/m ²)	0,0 0	- 455,50	- 863,06	- 1.222, 67	- 1.534, 33	- 1.798, 04	- 2.013, 81	- 2.181, 63	- 2.301, 50	- 2.373, 42	- 2.397, 39
g	σ_i (kN/m ²)	0,0 0	2.470, 41	4.680, 78	6.631, 11	8.321, 39	9.751, 63	10.921, 82	11.831, 97	12.482, 08	12.872, 15	13.002, 17
	σ_s (kN/m ²)	0,0 0	- 783,47	- 1.484, 47	- 2.102, 99	- 2.639, 05	- 3.092, 64	- 3.463, 75	- 3.752, 40	- 3.958, 58	- 4.082, 28	- 4.123, 52
g+p	σ_i (kN/m ²)	0,0 0	5.194, 04	9.841, 33	13.941, 89	17.495, 70	20.502, 77	22.963, 11	24.876, 70	26.243, 55	27.063, 66	27.337, 03
	σ_s (kN/m ²)	0,0 0	- 1.647, 24	- 3.121, 09	- 4.421, 54	- 5.548, 60	- 6.502, 26	- 7.282, 53	- 7.889, 41	- 8.322, 90	- 8.582, 99	- 8.669, 68

Fonte: Elaborado pelo Autor

Viga CUAD

Tabela 31 – Perdas de protensão por atrito CUAD

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	0,00	1259,64
S2	3,78	1255,86
S3	3,14	1252,73
S4	3,13	1249,60
S5	3,12	1246,48
S6	3,11	1243,37
S7	3,10	1240,26
S8	3,10	1237,17
S9	3,09	1234,08
S10	3,08	1231,00
S11	3,07	1227,92

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 32 – Perdas por acomodação das ancoragens CUAD

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-	1.150,67
S2	3,78	1.154,44
S3	3,14	1.157,58
S4	3,13	1.160,71
S5	3,12	1.163,83
S6	3,11	1.166,94
S7	3,10	1.170,05
S8	3,10	1.173,14
S9	3,09	1.176,23
S10	3,08	1.179,31
S11	3,07	1.182,39

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 33 – Perdas por cravação consecutiva CUAD

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-0,0429	1.150,62
S2	-0,0512	1.154,39
S3	-0,0597	1.157,52
S4	-0,0682	1.160,64
S5	-0,0761	1.163,75
S6	-0,0834	1.166,86
S7	-0,0896	1.169,96
S8	-0,0947	1.173,05
S9	-0,0984	1.176,13
S10	-0,1007	1.179,21
S11	-0,1014	1.182,28

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 34 – Protensão final CUAD

Seção	Nao (kN)
S1	3.257
S2	3.281
S3	3.278
S4	3.316
S5	3.335
S6	3.353
S7	3.371
S8	3.389
S9	3.407
S10	3.425
S11	3.443

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 35 – Combinações permanentes CUAD

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ fiss	Status
S1	-2.256	-11.532	3.528	OK
S2	-2.098	-12.077	3.528	OK
S3	-1.953	-12.600	3.528	OK
S4	-1.820	-13.031	3.528	OK
S5	-1.703	-13.438	3.528	OK
S6	-1.602	-13.797	3.528	OK
S7	-1.516	-14.105	3.528	OK
S8	-1.448	-14.361	3.528	OK
S9	-1.396	-14.562	3.528	OK
S10	-1.362	-14.706	3.528	OK
S11	-1.347	-14.793	3.528	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 36 – Combinações quase permanentes CUAD

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.256	-11.532	3.528	OK
S2	-2.592	-10.519	3.528	OK
S3	-2.889	-9.648	3.528	OK
S4	-3.147	-8.849	3.528	OK
S5	-3.368	-8.190	3.528	OK
S6	-3.552	-7.646	3.528	OK
S7	-3.701	-7.216	3.528	OK
S8	-3.814	-6.898	3.528	OK
S9	-3.893	-6.689	3.528	OK
S10	-3.937	-6.587	3.528	OK
S11	-3.948	-6.592	3.528	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 37 – Combinações frequentes CUAD

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.256	-11.532	3.528	OK
S2	-2.921	-9.480	3.528	OK
S3	-3.513	-7.679	3.528	OK
S4	-4.031	-6.060	3.528	OK
S5	-4.478	-4.690	3.528	OK
S6	-4.853	-3.546	3.528	OK
S7	-5.158	-2.624	3.528	OK
S8	-5.392	-1.922	3.528	OK
S9	-5.557	-1.440	3.528	OK
S10	-5.654	-1.175	3.528	OK
S11	-5.682	-1.124	3.528	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

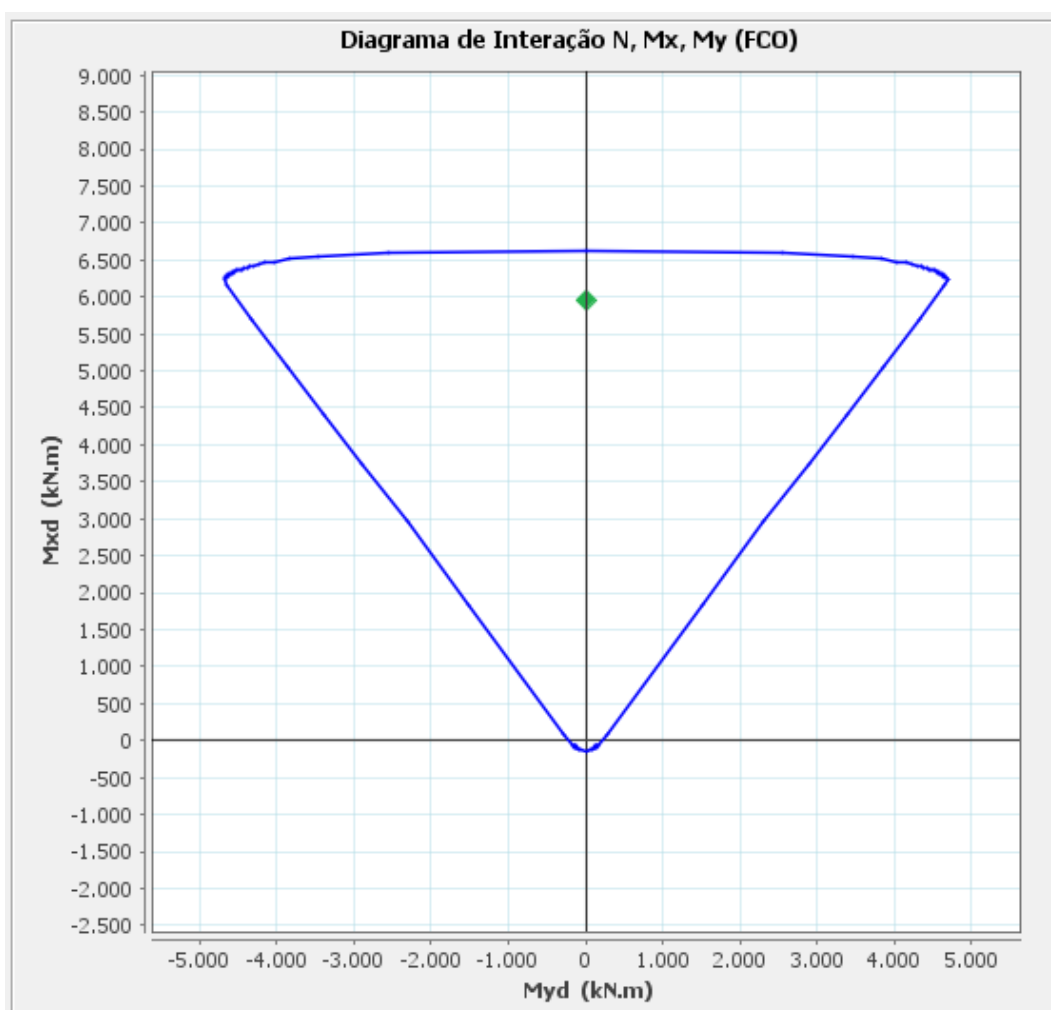
Tabela 38 – Combinações Raras CUAD

Seção	Total			Conferência
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.256	-11.532	3.528	OK
S2	-3.745	-6.883	3.528	OK
S3	-5.074	-2.759	3.528	OK
S4	-6.242	911	3.528	OK
S5	-7.252	4.057	3.528	NÃO ATENDE
S6	-8.104	6.706	3.528	NÃO ATENDE
S7	-8.799	8.858	3.528	NÃO ATENDE
S8	-9.337	10.516	3.528	NÃO ATENDE
S9	-9.719	11.682	3.528	NÃO ATENDE
S10	-9.945	12.357	3.528	NÃO ATENDE
S11	-10.017	12.544	3.528	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pelo Autor

NECESSÁRIO ARMAR SEÇÕES S5 A S11

Figura 45 – Estado Limite Último CUAD



Fonte: Junior ([s.d.])

CCA10

Tabela 39 – Perdas de protensão por atrito CCA10

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	0,00	1259,64
S2	3,78	1255,86
S3	3,14	1252,73
S4	3,13	1249,60
S5	3,12	1246,48
S6	3,11	1243,37
S7	3,10	1240,26
S8	3,10	1237,17
S9	3,09	1234,08
S10	3,08	1231,00
S11	3,07	1227,92

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 40 – Perdas por acomodação das ancoragens CCA10

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-	1.150,67
S2	3,78	1.154,44
S3	3,14	1.157,58
S4	3,13	1.160,71
S5	3,12	1.163,83
S6	3,11	1.166,94
S7	3,10	1.170,05
S8	3,10	1.173,14
S9	3,09	1.176,23
S10	3,08	1.179,31
S11	3,07	1.182,39

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 41 – Perdas por cravação consecutiva CCA10

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-0,04909	1.150,62
S2	-0,05873	1.154,39
S3	-0,06865	1.157,51
S4	-0,07844	1.160,63
S5	-0,08769	1.163,74
S6	-0,09608	1.166,84
S7	-0,10333	1.169,94
S8	-0,10921	1.173,03
S9	-0,11353	1.176,12
S10	-0,11618	1.179,20
S11	-0,11707	1.182,27

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 42 – Protensão final CCA10

Seção	Nao (kN)
S1	3.257
S2	3.281
S3	3.278
S4	3.316
S5	3.335
S6	3.353
S7	3.371
S8	3.389
S9	3.407
S10	3.425
S11	3.443

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 43 – Combinações permanentes CCA10

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.108	OK
S2	-2.181	-11.814	3.108	OK
S3	-2.036	-12.336	3.108	OK
S4	-1.904	-12.767	3.108	OK
S5	-1.787	-13.173	3.108	OK
S6	-1.686	-13.532	3.108	OK
S7	-1.601	-13.839	3.108	OK
S8	-1.532	-14.094	3.108	OK
S9	-1.481	-14.295	3.108	OK
S10	-1.447	-14.439	3.108	OK
S11	-1.432	-14.525	3.108	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 44 – Combinações quase permanentes CCA10

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.108	OK
S2	-2.675	-10.255	3.108	OK
S3	-2.973	-9.383	3.108	OK
S4	-3.231	-8.584	3.108	OK
S5	-3.452	-7.925	3.108	OK
S6	-3.637	-7.381	3.108	OK
S7	-3.785	-6.950	3.108	OK
S8	-3.899	-6.631	3.108	OK
S9	-3.978	-6.422	3.108	OK
S10	-4.022	-6.320	3.108	OK
S11	-4.033	-6.323	3.108	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 45 – Combinações frequentes CCA10

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.108	OK
S2	-3.005	-9.217	3.108	OK
S3	-3.597	-7.415	3.108	OK
S4	-4.115	-5.796	3.108	OK
S5	-4.562	-4.425	3.108	OK
S6	-4.937	-3.280	3.108	OK
S7	-5.242	-2.358	3.108	OK
S8	-5.477	-1.656	3.108	OK
S9	-5.642	-1.173	3.108	OK
S10	-5.739	-907	3.108	OK
S11	-5.767	-856	3.108	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

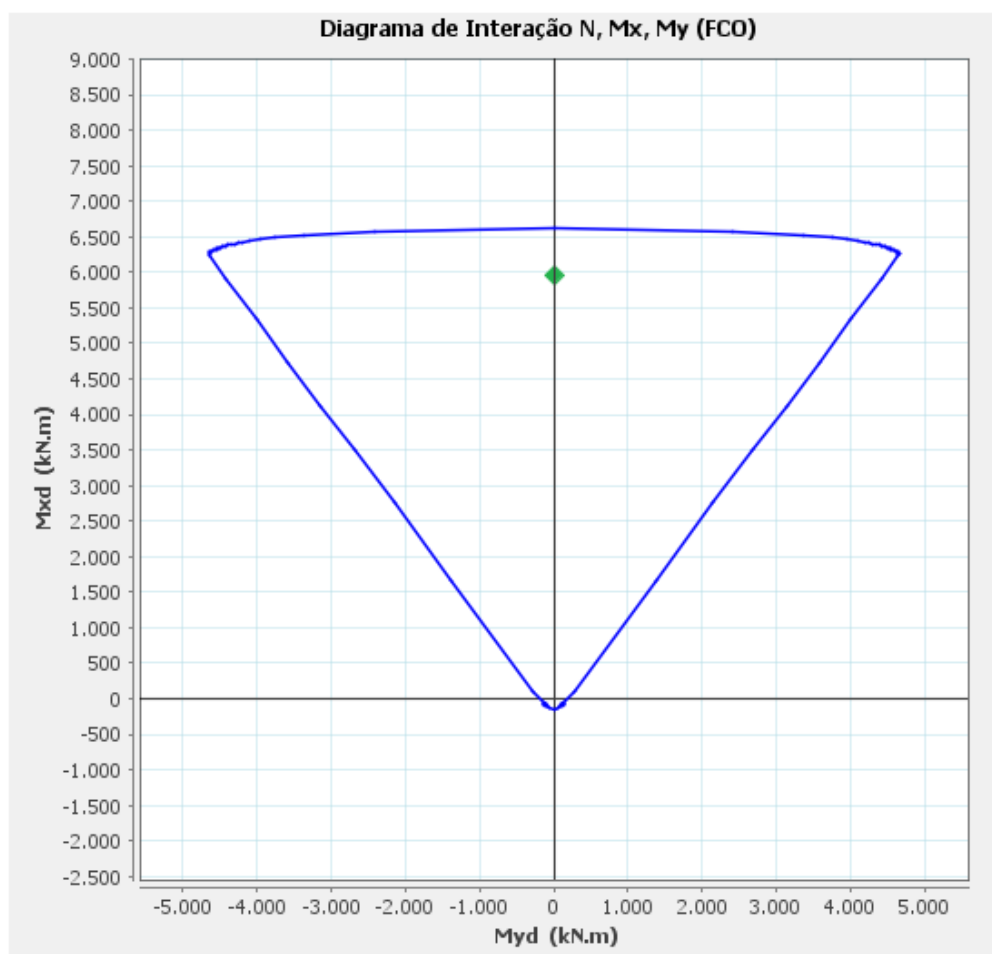
Tabela 46 – Combinações Raras CCA10

Seção	Tensão (kN/m²)			Conferência
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.108	OK
S2	-3.829	-6.620	3.108	OK
S3	-5.158	-2.494	3.108	OK
S4	-6.326	1.175	3.108	OK
S5	-7.336	4.322	3.108	NÃO ATENDE
S6	-8.188	6.971	3.108	NÃO ATENDE
S7	-8.883	9.124	3.108	NÃO ATENDE
S8	-9.422	10.782	3.108	NÃO ATENDE
S9	-9.804	11.949	3.108	NÃO ATENDE
S10	-10.030	12.625	3.108	NÃO ATENDE
S11	-10.102	12.812	3.108	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pelo Autor

NECESSÁRIO ARMAR SEÇÕES S5 A S11

Figura 46 – Estado Limite Último CCA10



Fonte: Junior ([s.d.])

CCA20

Tabela 47 – Perdas de protensão por atrito CCA20

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	0,00	1259,64
S2	3,78	1255,86
S3	3,14	1252,73
S4	3,13	1249,60
S5	3,12	1246,48
S6	3,11	1243,37
S7	3,10	1240,26
S8	3,10	1237,17
S9	3,09	1234,08
S10	3,08	1231,00
S11	3,07	1227,92

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 48 – Perdas por acomodação das ancoragens CCA20

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-	1.150,67
S2	3,78	1.154,44
S3	3,14	1.157,58
S4	3,13	1.160,71
S5	3,12	1.163,83
S6	3,11	1.166,94
S7	3,10	1.170,05
S8	3,10	1.173,14
S9	3,09	1.176,23
S10	3,08	1.179,31
S11	3,07	1.182,39

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 49 – Perdas por cravação consecutiva CCA20

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-0,04909	1.150,62
S2	-0,05873	1.154,39
S3	-0,06865	1.157,51
S4	-0,07844	1.160,63
S5	-0,08769	1.163,74
S6	-0,09608	1.166,84
S7	-0,10333	1.169,94
S8	-0,10921	1.173,03
S9	-0,11353	1.176,12
S10	-0,11618	1.179,20
S11	-0,11707	1.182,27

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 50 – Protensão final CCA20

Seção	Nao (kN)
S1	3.257
S2	3.281
S3	3.278
S4	3.316
S5	3.335
S6	3.353
S7	3.371
S8	3.389
S9	3.407
S10	3.425
S11	3.443

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 51 – Combinações permanentes CCA20

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	2.428	OK
S2	-2.181	-11.814	2.428	OK
S3	-2.036	-12.336	2.428	OK
S4	-1.904	-12.767	2.428	OK
S5	-1.787	-13.173	2.428	OK
S6	-1.686	-13.532	2.428	OK
S7	-1.601	-13.839	2.428	OK
S8	-1.532	-14.094	2.428	OK
S9	-1.481	-14.295	2.428	OK
S10	-1.447	-14.439	2.428	OK
S11	-1.432	-14.525	2.428	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 52 – Combinações quase permanentes CCA20

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ fiss	Status
S1	-2.340	-11.269	2.428	OK
S2	-2.675	-10.255	2.428	OK
S3	-2.973	-9.383	2.428	OK
S4	-3.231	-8.584	2.428	OK
S5	-3.452	-7.925	2.428	OK
S6	-3.637	-7.381	2.428	OK
S7	-3.785	-6.950	2.428	OK
S8	-3.899	-6.631	2.428	OK
S9	-3.978	-6.422	2.428	OK
S10	-4.022	-6.320	2.428	OK
S11	-4.033	-6.323	2.428	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 53 – Combinações frequentes CCA20

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ fiss	Status
S1	-2.340	-11.269	2.428	OK
S2	-3.005	-9.217	2.428	OK
S3	-3.597	-7.415	2.428	OK
S4	-4.115	-5.796	2.428	OK
S5	-4.562	-4.425	2.428	OK
S6	-4.937	-3.280	2.428	OK
S7	-5.242	-2.358	2.428	OK
S8	-5.477	-1.656	2.428	OK
S9	-5.642	-1.173	2.428	OK
S10	-5.739	-907	2.428	OK
S11	-5.767	-856	2.428	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

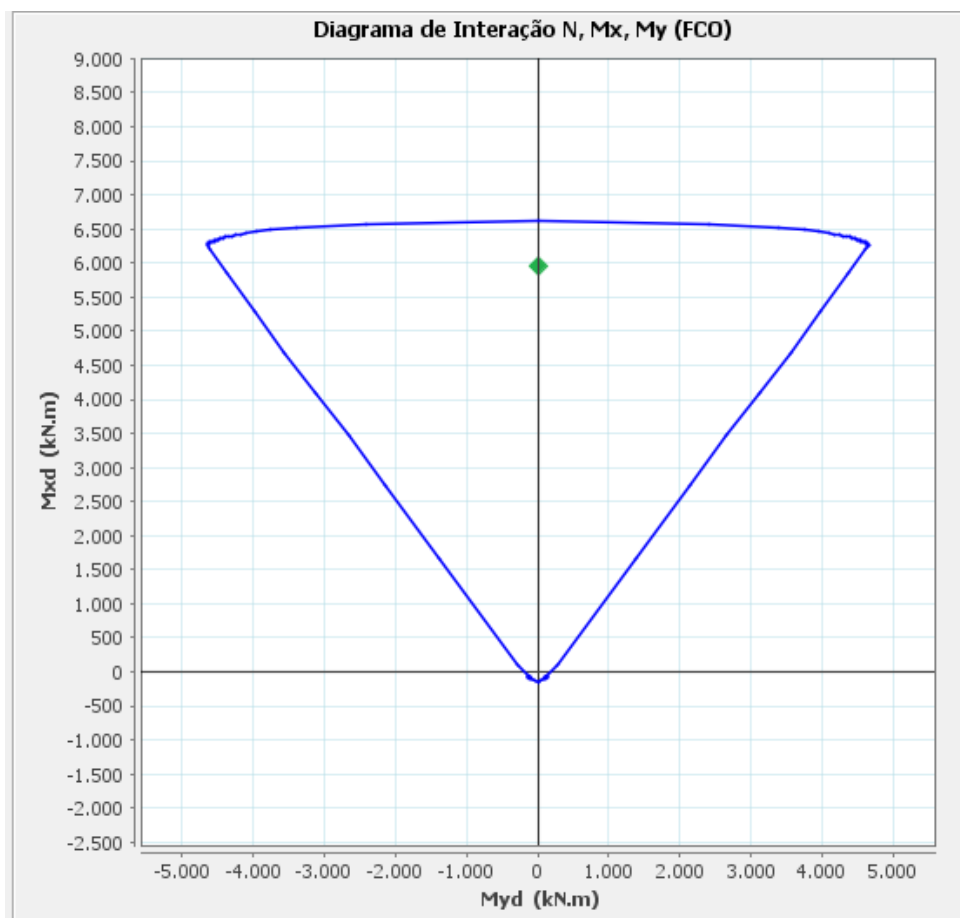
Tabela 54 – Combinações Raras CCA20

Seção	Tensão (kN/m ²)			Conferência
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	2.428	OK
S2	-3.829	-6.620	2.428	OK
S3	-5.158	-2.494	2.428	OK
S4	-6.326	1.175	2.428	OK
S5	-7.336	4.322	2.428	NÃO ATENDE
S6	-8.188	6.971	2.428	NÃO ATENDE
S7	-8.883	9.124	2.428	NÃO ATENDE
S8	-9.422	10.782	2.428	NÃO ATENDE
S9	-9.804	11.949	2.428	NÃO ATENDE
S10	-10.030	12.625	2.428	NÃO ATENDE
S11	-10.102	12.812	2.428	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pelo Autor

NECESSÁRIO ARMAR SEÇÕES S5 A S11

Figura 47 – Estado Limite Último CCA20



Fonte: Junior ([s.d.])

CBCA10

Tabela 55 – Perdas de protensão por atrito CBCA10

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	0,00	1259,64
S2	3,78	1255,86
S3	3,14	1252,73
S4	3,13	1249,60
S5	3,12	1246,48
S6	3,11	1243,37
S7	3,10	1240,26
S8	3,10	1237,17
S9	3,09	1234,08
S10	3,08	1231,00
S11	3,07	1227,92

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 56 – Perdas por acomodação das ancoragens CBCA10

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-	1.150,67
S2	3,78	1.154,44
S3	3,14	1.157,58
S4	3,13	1.160,71
S5	3,12	1.163,83
S6	3,11	1.166,94
S7	3,10	1.170,05
S8	3,10	1.173,14
S9	3,09	1.176,23
S10	3,08	1.179,31
S11	3,07	1.182,39

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 57 – Perdas por cravação consecutiva CBCA10

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-0,04909	1.150,62
S2	-0,05873	1.154,39
S3	-0,06865	1.157,51
S4	-0,07844	1.160,63
S5	-0,08769	1.163,74
S6	-0,09608	1.166,84
S7	-0,10333	1.169,94
S8	-0,10921	1.173,03
S9	-0,11353	1.176,12
S10	-0,11618	1.179,20
S11	-0,11707	1.182,27

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 58 – Protensão final CBCA10

Seção	Nao (kN)
S1	3.257
S2	3.281
S3	3.278
S4	3.316
S5	3.335
S6	3.353
S7	3.371
S8	3.389
S9	3.407
S10	3.425
S11	3.443

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 59 – Combinações permanentes CBCA10

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.923	OK
S2	-2.181	-11.814	3.923	OK
S3	-2.036	-12.336	3.923	OK
S4	-1.904	-12.767	3.923	OK
S5	-1.787	-13.173	3.923	OK
S6	-1.686	-13.532	3.923	OK
S7	-1.601	-13.839	3.923	OK
S8	-1.532	-14.094	3.923	OK
S9	-1.481	-14.295	3.923	OK
S10	-1.447	-14.439	3.923	OK
S11	-1.432	-14.525	3.923	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 60 – Combinações quase permanentes CBCA10

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ fiss	Status
S1	-2.340	-11.269	3.923	OK
S2	-2.675	-10.255	3.923	OK
S3	-2.973	-9.383	3.923	OK
S4	-3.231	-8.584	3.923	OK
S5	-3.452	-7.925	3.923	OK
S6	-3.637	-7.381	3.923	OK
S7	-3.785	-6.950	3.923	OK
S8	-3.899	-6.631	3.923	OK
S9	-3.978	-6.422	3.923	OK
S10	-4.022	-6.320	3.923	OK
S11	-4.033	-6.323	3.923	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 61 – Combinações frequentes CBCA10

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ fiss	Status
S1	-2.340	-11.269	3.923	OK
S2	-3.005	-9.217	3.923	OK
S3	-3.597	-7.415	3.923	OK
S4	-4.115	-5.796	3.923	OK
S5	-4.562	-4.425	3.923	OK
S6	-4.937	-3.280	3.923	OK
S7	-5.242	-2.358	3.923	OK
S8	-5.477	-1.656	3.923	OK
S9	-5.642	-1.173	3.923	OK
S10	-5.739	-907	3.923	OK
S11	-5.767	-856	3.923	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

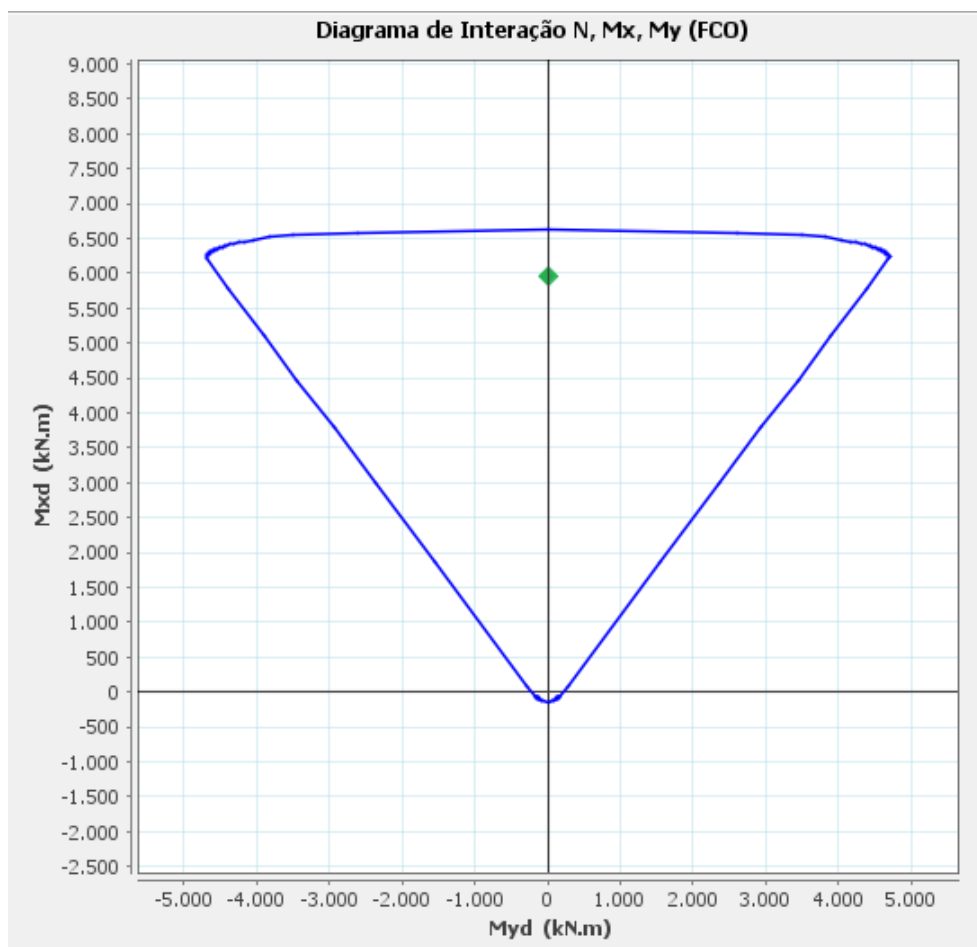
Tabela 62 – Combinações Raras CBCA10

Seção	Tensão (kN/m ²)			Conferência
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.923	OK
S2	-3.829	-6.620	3.923	OK
S3	-5.158	-2.494	3.923	OK
S4	-6.326	1.175	3.923	OK
S5	-7.336	4.322	3.923	NÃO ATENDE
S6	-8.188	6.971	3.923	NÃO ATENDE
S7	-8.883	9.124	3.923	NÃO ATENDE
S8	-9.422	10.782	3.923	NÃO ATENDE
S9	-9.804	11.949	3.923	NÃO ATENDE
S10	-10.030	12.625	3.923	NÃO ATENDE
S11	-10.102	12.812	3.923	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pelo Autor

NECESSÁRIO ARMAR SEÇÕES S5 A S11

Figura 48 – Estado Limite Último CBCA10



Fonte: Junior ([s.d.])

CBCA20

Tabela 63 – Perdas de protensão por atrito CBCA20

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	0,00	1259,64
S2	3,78	1255,86
S3	3,14	1252,73
S4	3,13	1249,60
S5	3,12	1246,48
S6	3,11	1243,37
S7	3,10	1240,26
S8	3,10	1237,17
S9	3,09	1234,08
S10	3,08	1231,00
S11	3,07	1227,92

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 64 – Perdas por acomodação das ancoragens CBCA20

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-	1.150,67
S2	3,78	1.154,44
S3	3,14	1.157,58
S4	3,13	1.160,71
S5	3,12	1.163,83
S6	3,11	1.166,94
S7	3,10	1.170,05
S8	3,10	1.173,14
S9	3,09	1.176,23
S10	3,08	1.179,31
S11	3,07	1.182,39

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 65 – Perdas por cravação consecutiva CBCA20

Seção	Δp_i (kN)	Pf (kN)
S1	-0,04909	1.150,62
S2	-0,05873	1.154,39
S3	-0,06865	1.157,51
S4	-0,07844	1.160,63
S5	-0,08769	1.163,74
S6	-0,09608	1.166,84
S7	-0,10333	1.169,94
S8	-0,10921	1.173,03
S9	-0,11353	1.176,12
S10	-0,11618	1.179,20
S11	-0,11707	1.182,27

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 66 – Protensão final CBCA20

Seção	Nao (kN)
S1	3.257
S2	3.281
S3	3.278
S4	3.316
S5	3.335
S6	3.353
S7	3.371
S8	3.389
S9	3.407
S10	3.425
S11	3.443

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 67 – Combinações permanentes CBCA20

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.528	OK
S2	-2.181	-11.814	3.528	OK
S3	-2.036	-12.336	3.528	OK
S4	-1.904	-12.767	3.528	OK
S5	-1.787	-13.173	3.528	OK
S6	-1.686	-13.532	3.528	OK
S7	-1.601	-13.839	3.528	OK
S8	-1.532	-14.094	3.528	OK
S9	-1.481	-14.295	3.528	OK
S10	-1.447	-14.439	3.528	OK
S11	-1.432	-14.525	3.528	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 68 – Combinações quase permanentes CBCA20

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.528	OK
S2	-2.675	-10.255	3.528	OK
S3	-2.973	-9.383	3.528	OK
S4	-3.231	-8.584	3.528	OK
S5	-3.452	-7.925	3.528	OK
S6	-3.637	-7.381	3.528	OK
S7	-3.785	-6.950	3.528	OK
S8	-3.899	-6.631	3.528	OK
S9	-3.978	-6.422	3.528	OK
S10	-4.022	-6.320	3.528	OK
S11	-4.033	-6.323	3.528	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 69 – Combinações frequentes CBCA20

Seção	Tensão (kN/m ²)		Conferência	
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.528	OK
S2	-3.005	-9.217	3.528	OK
S3	-3.597	-7.415	3.528	OK
S4	-4.115	-5.796	3.528	OK
S5	-4.562	-4.425	3.528	OK
S6	-4.937	-3.280	3.528	OK
S7	-5.242	-2.358	3.528	OK
S8	-5.477	-1.656	3.528	OK
S9	-5.642	-1.173	3.528	OK
S10	-5.739	-907	3.528	OK
S11	-5.767	-856	3.528	OK

Fonte: Elaborado pelo Autor

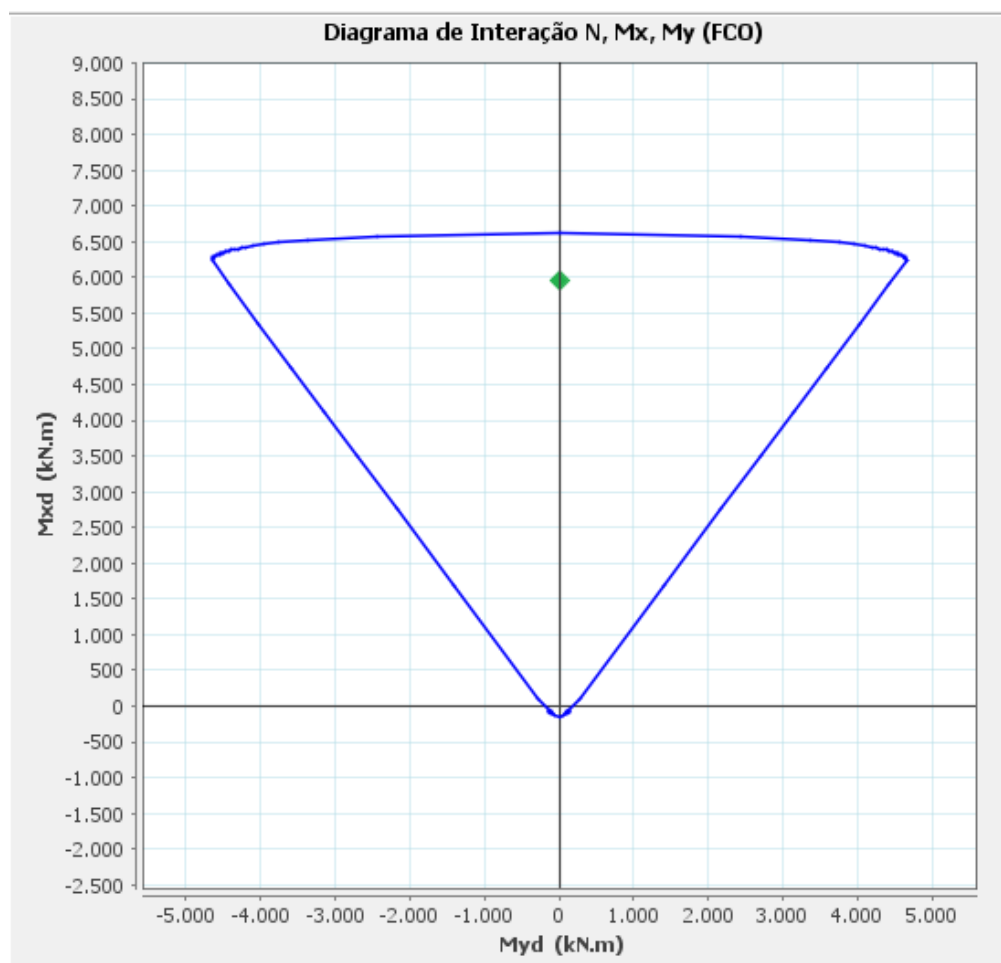
Tabela 70 – Combinações Raras CBCA20

Seção	Tensão (kN/m²)			Conferência
	σ_s	σ_i	σ_{fiss}	Status
S1	-2.340	-11.269	3.528	OK
S2	-3.829	-6.620	3.528	OK
S3	-5.158	-2.494	3.528	OK
S4	-6.326	1.175	3.528	OK
S5	-7.336	4.322	3.528	NÃO ATENDE
S6	-8.188	6.971	3.528	NÃO ATENDE
S7	-8.883	9.124	3.528	NÃO ATENDE
S8	-9.422	10.782	3.528	NÃO ATENDE
S9	-9.804	11.949	3.528	NÃO ATENDE
S10	-10.030	12.625	3.528	NÃO ATENDE
S11	-10.102	12.812	3.528	NÃO ATENDE

Fonte: Elaborado pelo Autor

NECESSÁRIO ARMAR SEÇÕES S5 A S11

Figura 49 – Estado Limite Último CBCA20



Fonte: Junior ([s.d.])