

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Arquitetura e Urbanismo.

Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado:
Uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do
dimensionamento

Tese de doutorado versão corrigida apresentada ao Programa de Pós –Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção de título de Doutor em Ciências da Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Autor: Ricardo Couceiro Bento.

Orientador: Prof. Dr. João Adriano Rossignolo.

São Carlos - SP
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B478a Bento, Ricardo Couceiro
Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento / Ricardo Couceiro Bento; orientador João Adriano Rossignolo. -- São Carlos, 2016.
216 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em em Arquitetura e Urbanismo) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2016.

1. Concreto armado. 2. Ciclo de Vida. 3. Sustentabilidade. 4. Edificações. 5. Projeto estrutural. I. Rossignolo, João Adriano, orient. II. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Ricardo Couceiro Bento**

Título da tese: "Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: Uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento"

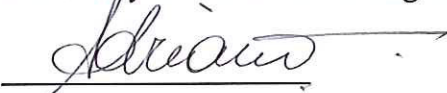
Data da defesa: 20/10/2016

Orientador: Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. João Adriano Rossignolo



(IAU/USP)

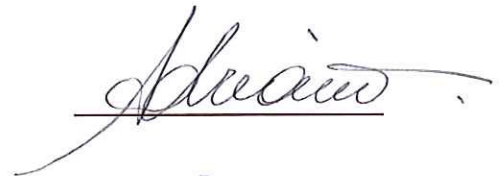
Prof. Dr. Marcio Minto Fabricio
(IAU/USP)



Prof. Dr. Paulo Roberto de Lago Helene
(Poli-USP)



Prof. Dr. Romel Dias Vandereli
(UEM)



Profa. Dra. Rosana Soares Bertocco Parisi
(PUC-Poços de Caldas)



Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Profa. Dra. **Cibele Saliba Rizek.**

Aos meus lindos filhos, Beatriz, Isabella e Thiago.

Tudo que lhes desejo é uma vida feliz.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Adriano Rossignolo pelo apoio e compreensão durante meus percalços e dificuldades enfrentados pelo caminho. Meu amigo: amizade eterna.

Ao Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei e ao Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto por suas colocações e orientação na fase de qualificação que me auxiliaram no direcionamento e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene, pelo incentivo e auxílio generosos durante todo o caminho percorrido. Apenas uma palavra: gratidão. Nunca será esquecido!

Ao corpo docente das diversas disciplinas da Universidade de São Paulo pelos conhecimentos transmitidos.

À minha família, pelo apoio e paciência neste período, para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com
o seu trabalho e realizações.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

BENTO, R. C. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: Uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento.** Tese (Doutorado) – programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O concreto armado, sistema estrutural mais utilizado no mundo, consome grandes quantidades de matérias-primas, em sua maioria compostas por materiais não renováveis, além de enormes quantidades de água e depende de grande quantidade de energia para o seu beneficiamento, além de emissões de gases e produção de resíduos perigosos. As decisões de projeto, entre elas a localização das obras, a definição do produto a ser construído, o partido arquitetônico e a especificação de materiais e componentes, afetam diretamente o consumo de recursos naturais e de energia, tal consumo é afetado também pela otimização ou não da execução e pelo efeito global no seu entorno, sem falar nos impactos estéticos e urbanísticos mais amplos. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o uso da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no auxílio da tomada de decisões em projetos estruturais de concreto armado, visando a melhoria do desempenho ambiental parte-se da hipótese de que é possível obter a melhoria por meio da análise, durante a fase de projeto, da utilização de diferentes classes de resistência do concreto, por meio de alterações (reduções) nas dimensões dos elementos estruturais bem como do consumo dos materiais componentes da estrutura. Discute-se primeiramente o conceito de desempenho ambiental, seguido do impacto ambiental da construção civil e seus materiais. Posteriormente foi apresentada a metodologia da ACV e sua aplicação na construção civil com uma revisão bibliográfica. O desenvolvimento experimental efetuado foi o projeto estrutural de edifício com 6 classes de resistência característica à compressão do concreto do grupo I de resistência, à partir da classe C25 até a C50. Os resultados apresentaram que as classes C40, C45 e C50 obtiveram os melhores resultados em quase todos os quesitos avaliados. Especificamente a C40 se apresentou como a melhor opção para a unidade funcional avaliada com o melhor desempenho. O desenvolvimento experimental demonstrou a viabilidade do uso da ACV neste tipo de avaliação porém verifica-se a carência de maiores informações para execução de inventários e metodologia dirigida à realidade brasileira. Por fim, foram fornecidas orientações a todos os agentes intervenientes no projeto estrutural e execução da obra com a finalidade de ser alcançado o melhor desempenho ambiental das estruturas de concreto armado.

Palavras Chave: Desempenho Ambiental de Edificações. Avaliação do Ciclo de Vida. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. Sustentabilidade. Concreto Armado. Projeto Estrutural.

ABSTRACT

BENTO, R. C. Analysis of the environmental performance of reinforced concrete structures: Use of Life Cycle Assessment (LCA) in decision-making process. Thesis (Ph.D.) - Graduate Program in Architecture and Urbanism, Area of Concentration in Architecture, Urbanism and Technology - Institute of Architecture and Urbanism at the University of São Paulo, São Carlos, 2016.

The reinforced concrete, most widely used structural system in the world, which consumes large amounts of raw materials, mostly composed of non-renewable materials, and huge amounts of water, depends on lot of energy for its processing, and gas emissions and hazardous waste generation. design decisions, such as location of works, the product definition to be built, the architectural party and specification of materials and components directly affect the consumption of natural resources and energy, as well as the optimization or not the execution and overall effect on its surroundings, not to mention the broader aesthetic and urbanistic impact. The objective of this research was to evaluate the use of the methodology of Life Cycle Assessment (LCA) to aid decision-making in structural design of reinforced concrete in order to improve the environmental performance starting from the hypothesis that can- yield improvement by analyzing, during the design stage, the use of different grades of concrete strength through changes (decreases) the dimensions of structural elements as well as the consumption of the component materials of the structure. At work was first discussed the concept of environmental performance, followed by the environmental impact of construction and its materials. The methodology of LCA and its application in construction with a literature review was presented later. The experimental development was made the building structural design with 6 classes of resistance characteristic of the group I concrete compressive strength, the class from the C25 to C50. The results showed that the C40 classes, C45 and C50 have the best results almost all the variables evaluated and specifically the C40 presented as the best option for the functional unit evaluated with the best performance. Experimental development demonstrated the feasibility of using ACV in this type of evaluation but still in need of more information for the execution of inventories and methodology will run Brazilian reality. Finally they were provided guidance to all actors involved in the structural design and execution of the work in order to be achieved the best environmental performance of reinforced concrete structures.

Keywords: Environmental Performance of Buildings . Life Cycle Assessment . Impact Assessment of Life Cycle . Sustainability. Reinforced Concrete . Structural Design

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Programa de gestão ambiental conforme a ISO 14.001.....	22
FIGURA 2: Distribuição Setorial do consumo de produtos siderúrgicos.....	45
FIGURA 3: Etapas de ACV e suas interações NBR 14040.....	52
FIGURA 4: Modelo tridimensional do princípio básico da ACV integrada.....	71
FIGURA 5: Organograma do processo de uma ACVI aplicado a diferentes tipos de estruturas de concreto.....	72
FIGURA 6: Ciclo de vida da estrutura de concreto.....	72
FIGURA 7: Fases do ciclo de vida da estrutura de concreto.....	73
FIGURA 8: Edifício padrão conforme a ABNT NBR 12721:2006 – Avaliação de custos para a incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios de edifícios.....	95
FIGURA 9: Planta de arquitetura e forma da estrutura do pavimento tipo do edifício em análise.....	98
FIGURA 10: Vista 3D da estrutura projetada.....	99
FIGURA 11: Projeções de consumo de concreto.....	103
FIGURA 12: Fluxograma do sistema de produto.....	105
FIGURA 13: Gráfico de consumo de cimento/m ² e concreto/m ²	117
FIGURA 14: Gráfico de consumo de aço/m ² e aço/m ³ concreto.....	118
FIGURA 15: Categoria de impacto potencial de acidificação, EDIP 1997.....	123
FIGURA 16: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto de acidificação potencial, EDIP 1997.....	124
FIGURA 17: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997 categoria de impacto acidificação potencial.....	125
FIGURA 18: Categoria de impacto potencial de Ecotoxicidade crônica do solo, EDIP 1997.....	127
FIGURA 19: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto de Ecotoxicidade crônica do solo, EDIP 1997.....	128

FIGURA 20: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial de Ecotoxicidade crônica do solo.....	129
FIGURA 21: Categoria de impacto potencial de Ecotoxicidade aguda da água, EDIP 1997.....	130
FIGURA 22: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto de Ecotoxicidade aguda da água, EDIP 1997.....	131
FIGURA 23: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial de Ecotoxicidade aguda da água.....	131
FIGURA 24: Categoria de impacto potencial de Ecotoxicidade crônica da água, EDIP 1997.....	132
FIGURA 25: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto de Ecotoxicidade crônica da água, EDIP 1997.....	133
FIGURA 26: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial de Ecotoxicidade crônica da água.....	133
FIGURA 27: Categoria de impacto potencial de aquecimento global, EDIP 1997.....	134
FIGURA 28: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto potencial de aquecimento global, EDIP 1997.....	135
FIGURA 29: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial de aquecimento global.....	136
FIGURA 30: Categoria de impacto potencial de toxicidade humana ao ar, EDIP 1997.....	138
FIGURA 31: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto toxicidade humana ao ar, EDIP 1997.....	139
FIGURA 32: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial toxicidade humana ao ar.....	139
FIGURA 33: Categoria de impacto potencial de toxicidade humana ao solo, EDIP 1997.....	140
FIGURA 34: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto toxicidade humana ao solo, EDIP 1997.....	141
FIGURA 35: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial toxicidade humana ao solo.....	142
FIGURA 36: Categoria de impacto potencial de toxicidade humana na água, EDIP 1997.....	143
FIGURA 37: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto toxicidade humana na água, EDIP 1997.....	144

FIGURA 38: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial toxicidade humana na água.....	144
FIGURA 39: Categoria de impacto potencial de eutrofização, EDIP 1997.....	145
FIGURA 40: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto eutrofização, EDIP 1997.....	146
FIGURA 41: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial de eutrofização.....	147
FIGURA 42: Categoria de impacto potencial de destruição do ozônio estratosférico, EDIP 1997.....	148
FIGURA 43: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto potencial de destruição do ozônio estratosférico, EDIP 1997.....	149
FIGURA 44: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial de destruição do ozônio estratosférico.....	150
FIGURA 45: Categoria de impacto potencial de formação de ozônio fotoquímico (alto concentração de NOx) EDIP 199.....	151
FIGURA 46: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto formação de ozônio fotoquímico (alta concentração de NOx), EDIP 1997.....	152
FIGURA 47: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial formação de ozônio fotoquímico (alta concentração de NOx)..	153
FIGURA 48: Categoria de impacto potencial de formação de ozônio fotoquímico (baixa concentração de NOx), EDIP 199.....	154
FIGURA 49: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 categoria de impacto formação de ozônio fotoquímico (baixa concentração de NOx), EDIP 1997.....	154
FIGURA 50: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997, categoria de impacto potencial formação ozônio fotoquímico (baixa concentração de NOx)....	155
FIGURA 51: Consumo de recursos energéticos não renováveis.....	157
FIGURA 52: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 consumo de recursos energéticos não renováveis.....	158
FIGURA 53: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, consumo de recursos energéticos não renováveis.....	159
FIGURA 54: Consumo de recursos energéticos renováveis.....	160

FIGURA 55: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 consumo de recursos energéticos renováveis.....	161
FIGURA 56: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, consumo de recursos energéticos renováveis.....	162
FIGURA 57: Consumo de recursos materiais não renováveis.....	163
FIGURA 58: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 consumo de recursos materiais não renováveis.....	164
FIGURA 59: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, consumo de recursos materiais não renováveis.....	164
FIGURA 60: Consumo de recursos materiais renováveis.....	166
FIGURA 61: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 consumo de recursos materiais renováveis.....	166
FIGURA 62: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, consumo de recursos materiais renováveis.....	167
FIGURA 63: Relação entre o consumo de cimento/m ² e água/m ² no concreto da estrutura.....	168
FIGURA 64: Geração de resíduos.....	169
FIGURA 65: Contribuições dos processos de produção para a classe C25 na geração de resíduos.....	170
FIGURA 66: Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25 na geração de resíduos.....	171
FIGURA 67: Informações que alimentam o projeto estrutural fornecidas pela equipe multidisciplinar e outras fontes.....	187

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos.....	37
QUADRO 2: Consumo de material e índices da estrutura classe C25.....	114
QUADRO 3: Consumo de material e índices da estrutura classe C30.....	115
QUADRO 4: Consumo de material e índices da estrutura classe C35.....	115
QUADRO 5: Consumo de material e índices da estrutura classe C40.....	116
QUADRO 6: Consumo de material e índices da estrutura classe C45.....	116
QUADRO 7: Consumo de material e índices da estrutura classe C50.....	117
QUADRO 8: Categoria de impacto potencial e consumo de recursos naturais x classe de resistência da estrutura para 1m ² da unidade funcional.....	122
QUADRO 9: Consumo de recursos energéticos não renováveis.....	157
QUADRO 10: Relação entre o consumo de materiais da estrutura/m ² x classe de resistência da estrutura ordenada pelo menor impacto de consumo de recursos materiais renováveis.....	168
QUADRO 11: Relação entre o consumo de materiais da estrutura/m ² x classe de resistência da estrutura ordenada pelo menor impacto de geração de resíduos.....	172
QUADRO 12: Balanço geral EDIP 97.....	173
QUADRO 13: Balanço geral EDIP 97 – Classe de resistência x frequência de classificação dos resultados.....	176
QUADRO 14: Categoria de impacto ambiental c classe de resistência do concreto metodologia EDIP 2003.....	177
QUADRO 15: Balanço Geral EDIP 2003.....	178
QUADRO 16: Correspondência das classes de resistência do concreto com as categorias de impacto ambiental globais, Aquecimento Global e Destruição de Ozônio Fotoquímico Estratosférico entre a metodologia EDIP 1997 e a metodologia EDIP 2003.....	179
QUADRO 17: Categoria de impacto ambiental x classe de resistência metodologia recomendações ILCD Handbook.....	180
QUADRO 18: Balanço geral – Metodologia Recomendações ILCD Handbook.....	181
QUADRO 19: Custos da estrutura/m ² x Classe de resistência.....	190

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	16
1.1. O impacto ambiental das atividades humanas.....	16
1.2 Avaliação do desempenho ambiental.....	17
1.3 O impacto ambiental do setor da construção civil.....	27
1.4 Hipótese da Tese.....	32
1.5 Objetivos.....	33
1.6 Objetivos específicos.....	33
CAPÍTULO 2. MATERIAIS COMPONENTES DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E SEUS PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS.....	34
2.1. Cimento Portland.....	34
2.1.1. Cimentos Portland com adições minerais.....	36
2.2 Agregados.....	41
2.3 Água.....	42
2.4 Aditivos.....	43
2.5 Aço.....	43
2.6 Madeiras para formas.....	46
2.7 Outros fatores em projeto e produção de estruturas de concreto armado.....	47
CAPÍTULO 3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	49
3.1 Descrição geral da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).....	52
3.1.1. Definição e objetivo do escopo.....	53
3.1.2. Inventário do Ciclo de Vida (ICV) – modelagem da estrutura.....	56
3.1.3. Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV).....	57
3.1.4. Interpretação do Ciclo de Vida.....	60

CAPÍTULO 4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	61
4.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de estruturas de concreto armado.....	67
4.1.1. Revisão de pesquisas sobre ACV de estruturas de concreto armado.....	76
CAPÍTULO 5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	93
5.1 Aplicação Pretendida.....	93
5.2 Limitações do método, suposições e impactos.....	94
5.3 Público alvo do estudo.....	94
5.4 Estudos comparativos a serem abertos ao público.....	94
5.5 Escopo.....	95
5.5.1. Tipos de entregas e aplicações pretendidas.....	95
5.5.2. Função.....	96
5.5.3. Unidade funcional.....	97
5.5.4. Fluxo de referência.....	99
5.5.4.1. Quantitativo de materiais.....	101
5.5.5. Escopo geográfico.....	102
5.5.6. Escopo temporal.....	103
5.5.7. Escopo tecnológico.....	104
5.5.8. Estrutura de modelagem do Inventário do Ciclo de Vida.....	104
5.5.9. Obtenção das fronteiras do sistema em estudo.....	104
5.5.10. Preparação do embasamento para a avaliação do impacto.....	111
5.5.11. As fontes de dados, qualidade, incertezas e sua representatividade.....	112
5.5.12. Pressupostos e comparabilidade entre os sistemas.....	113
CAPÍTULO 6. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	114

CAPÍTULO 7. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA	120
7.1. Acidificação	123
7.2. Ecotoxicidade	126
7.3. Aquecimento Global	134
7.4. Toxicidade Humana	137
7.5. Eutrofização	145
7.6. Destruição do ozônio estratosférico	147
7.7. Formação do ozônio fotoquímico	150
7.8. Consumo de recursos energéticos não renováveis	156
7.9. Consumo de recursos energéticos renováveis	160
7.10. Consumo de recursos materiais não renováveis	163
7.11. Consumo de recursos materiais renováveis	165
7.12. Geração de resíduos	169
CAPÍTULO 8. INTERPRETAÇÃO	173
8.1. Análise da sensibilidade	176
CAPÍTULO 9. IMPLEMENTAÇÃO EM PROJETOS DE CONCRETO ARMADO DE CONCEITOS DE MELHORIA DE DESEMPENHO AMBIENTAL DAS ESTRUTURAS.....	183
9.1.O Processo de execução de projetos	183
9.2.Contribuições de agentes participantes no projeto da estrutura de concreto...187	
9.3.Contribuições de agentes participantes na execução da estrutura de concreto	190
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	193
10.1. Continuidade da pesquisa	196
11. REFERÊNCIAS	198
12. ANEXOS	216

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1) O impacto ambiental das atividades humanas.

As pesquisas mundiais referentes ao impacto ambiental das atividades humanas ocorrem em ritmo intenso. As possíveis consequências para o futuro do planeta são continuamente avaliadas.

A ciência do clima está dizendo que a probabilidade de um colapso desastroso do bem-estar do planeta não é negligenciável, apesar desta probabilidade não ser objetivamente conhecida (WEITEZMAN, 2009).

O consumo teve um crescimento tremendo nos últimos cinquenta anos. Parte desse aumento é resultante do crescimento populacional, em que o consumo aumentou uma proporção superior à população (a uma razão de 3 e 2,2 respectivamente). Como o consumo aumentou, mais combustíveis, minerais e metais foram extraídos do solo e mais terra foi cultivada para a produção de alimentos (ASSADOURIAN, 2010).

A exploração dos recursos para a manutenção de níveis de consumo cada vez mais altos, vem exercendo pressão crescente sobre os sistemas do planeta. Esse processo vem destruindo com grande impacto os sistemas ecológicos dos quais todas as espécies dependem.

No início da década de 1980, a ONU retomou o debate das questões ambientais. Indicada pela entidade, a primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, chefiou a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento para estudar o assunto. A comissão foi criada em 1983, após uma avaliação dos 10 anos da Conferência de Estocolmo, com o objetivo de promover audiências em todo o mundo e produzir um resultado

formal das discussões. O documento final desses estudos chamou-se “Nosso Futuro Comum” ou Relatório Brundtland. Apresentado em 1987, propõe pela primeira vez o conceito de desenvolvimento sustentável, que é “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades”. O conceito de desenvolvimento sustentável tem, é claro, limites - não limites absolutos, mas limitações impostas pelo estágio atual da tecnologia e da organização social, no tocante aos recursos ambientais, e pela capacidade da biosfera de absorver os efeitos da atividade humana. Mas tanto a tecnologia quanto a organização social podem ser geridas e aprimoradas a fim de proporcionar uma nova era de crescimento econômico (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991).

Em vista dessas características do modelo predominante de desenvolvimento, hoje é de total conhecimento que as companhias necessitam reduzir os impactos ambientais resultantes de suas atividades. No início dos tempos da “consciência ambiental industrial”, o foco eram as chamadas soluções “end of pipe”, isto é, as soluções buscadas na redução da quantidade de substâncias e emissões prejudiciais das instalações das indústrias. Isso tem sido desenvolvido recentemente e mudou para um alvo relativo ao desempenho ambiental dos produtos, o que reflete uma mudança para uma abordagem mais preventiva, em que o foco é sobre as causas dos problemas ambientais, ou seja, os produtos (JOHANSSON, 2002).

1.2) Avaliação do Desempenho Ambiental.

Com uma maior preocupação entre as atividades industriais desenvolvidas e os impactos resultantes sobre o meio ambiente, os procedimentos para o gerenciamento eficaz das relações entre o desenvolvimento econômico e o meio ambiente foram aperfeiçoados. A Inglaterra foi a precursora dos Sistemas de Gestão Ambiental normalizados, dando origem à

Norma BS-7750 (tendo sua primeira versão sido publicada em 1992). Em consequência com o interesse pelas questões ambientais em outras regiões, em 1993 foi implantado pela Organização Internacional de Padronização (ISO), o Comitê Técnico 207 (TC-207), com a incumbência de elaborar uma série de normas direcionadas para o meio ambiente, dando origem à série 14.000 (BRAGA et al, 2005).

Além de abordar os Sistemas de Gestão Ambiental, as normas da Série ISO 14.000 também tratam das diretrizes para a auditoria ambiental, rótulos e declarações ambientais, avaliação do desempenho ambiental e análise do ciclo de vida.

A ABNT NBR ISO 14.031:2015 – *Gestão Ambiental - Avaliação do desempenho ambiental – diretrizes*, em seu item 3.9, fornece a seguinte definição de desempenho ambiental: *resultados mensuráveis da gestão de uma organização sobre seus aspectos ambientais*.

Da interpretação do texto e mais as notas da norma citada, conclui-se que o desempenho ambiental é o cumprimento de objetivos e metas ambientais, decorrentes das intenções e princípios ambientais gerais (política ambiental) a que as organizações que mantenham um sistema de gestão ambiental se propõem atingir. Os objetivos devem ser mensuráveis e as metas estabelecidas para uma adequada avaliação do desempenho ambiental das organizações.

Ainda segundo a mesma publicação, em seu item 3.20, a organização é definida como: *empresa, corporação, firma, empreendimento, autoridade ou instituição, ou parte ou uma combinação desses, incorporada ou não, pública ou privada, que tenha funções e administração próprias*.

As diretrizes para a avaliação do desempenho ambiental são tratadas pela ABNT NBR ISO 14031:2015 . A norma indica categorias de indicadores a serem considerados na condução da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA).

Os indicadores são expressões quantitativas que fornecem informações sobre determinadas variáveis e suas inter-relações. Diferentes indicadores têm sido formulados para qualificar e/ou quantificar a situação das mais diversas áreas de interesse humano. Estes indicadores não espelham qualidade dos temas em sua totalidade, mas indiretamente servem de referência para abordá-los e tratá-los em seus aspectos mais sensíveis (FIESP/CIESP, 2004).

Os indicadores de desempenho ambiental representam valores numéricos, os quais fornecem informações importantes relacionadas com as questões ambientais. Eles medem numericamente atributos de um processo ou de seus resultados. Embora nenhuma evidência empírica clara tenha sido comprovada, acredita-se que indicadores também podem ter a capacidade para melhorar o desempenho ambiental (HENRI & JOURNEAULT, 2008).

Ao contrário das medidas de desempenho financeiro, as medidas de desempenho ambiental estão longe de serem padronizadas. Alguns pesquisadores utilizam uma variável ambiental qualitativa simples, enquanto outros criam vários tipos de variáveis ambientais quantitativas, geralmente referentes a algum tipo particular de poluição (HORVATHOVA, 2012).

A maioria dos estudos existentes, necessariamente não capturaram as características de cada questão ambiental suficientemente, uma vez que usam alguns índices como delegação para avaliação do desempenho ambiental. Nos últimos anos, tem havido muitos tipos de questões ambientais como o aquecimento global, chuva ácida, desmatamento, destruição da camada de ozônio, a biodiversidade, a poluição do meio ambiente por compostos químicos tóxicos, e os problemas dos resíduos, entre outros. Cada questão

ambiental tem características diferentes, tais como o alcance da poluição (por exemplo, locais ou globais), período de tempo até surgirem danos, a gravidade dos mesmos danos, facilidades para a especificação dos poluidores, além da existência de regulamentos e tratados internacionais (IWATA & OKADA, 2011).

Essas várias características sugerem que as diferentes partes interessadas podem colocar ênfase em diferentes questões ambientais. Algumas partes interessadas, por exemplo, uma comunidade local, pode sofrer diretamente pela poluição ambiental de uma empresa, enquanto outros podem não sofrer com isso, mas podem ter uma relação monetária com a empresa. Portanto, algumas partes interessadas podem pensar que o aquecimento global é um problema mais importante do que qualquer outra questão ambiental e as outras podem pensar que o problema dos resíduos é a questão mais crucial. Estas preferências diferenciadas das partes interessadas para as questões ambientais podem afetar o desempenho financeiro (ibid).

A ABNT NBR ISO 14031:2015 prescreve duas categorias de indicadores a serem considerados na condução da Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA):

- 1) O Indicador de Condição Ambiental (ICA) que fornece informações sobre a qualidade do meio ambiente onde se localiza a organização sob a forma de resultados de medições efetuadas de acordo com os padrões e regras ambientais estabelecidos pelas normas e dispositivos legais. Estas informações podem ajudar a organização a entender melhor o impacto real ou o impacto potencial de seus aspectos ambientais e assim auxiliar no planejamento e na implementação da ADA.
- 2) O Indicador de desempenho ambiental (IDA) é classificado em dois tipos:
 - a) Indicadores de desempenho gerencial (IDG) que fornecem informações sobre os esforços gerenciais para influenciar o desempenho ambiental das operações

da organização, como redução do consumo de água, melhoria na administração de resíduos sólidos, mantendo os mesmo valores de produção.

- b) Indicadores de desempenho operacional (IDO) que fornecem informações sobre o desempenho ambiental das operações da organização, como informações relacionadas às operações do processo produtivo com reflexos em seu desempenho ambiental, como consumo de água, energia ou matéria-prima entre outras.

Embora a norma proponha diretrizes gerais para medir e monitorar o desempenho ambiental (HENRI; JOURNEAULT, 2008), ela não oferece uma indicação clara do tipo de indicadores a serem utilizados pelas organizações. O uso de matérias-primas, água e energia, gestão de resíduos, emissões atmosféricas ou as relações externas são apenas algumas das muitas questões que poderiam ser cobertas por vários indicadores.

De um modo geral, o sistema ISO 14001 não define precisamente a natureza das ações ambientais a serem implementadas. Em vez disso, o mesmo propõe uma série de diretivas que incentivem a promoção de políticas, planos, programas de ação e os meios de controle adaptado para cada organização. Cabe às organizações a definição do conteúdo e os aspectos operacionais das diretrizes recomendadas pela norma (BOIRAL; HENRI, 2012). Outro fator a ser considerado é que a maioria das ações ambientais eficientes não estão diretamente ligadas à certificação ISO 14001. Isto se dá principalmente devido ao fato de que o modelo de eficiência padrão não é realmente usado por organizações como uma ferramenta para melhorar o desempenho e sim porque a sua implementação é, acima de tudo, o resultado da pressão externa por partes interessadas.

Portanto, a melhoria do desempenho ambiental resultante da certificação ISO 14001 não é automática, e pressupõe um esforço para conferir consistência operacional a este

sistema de gestão que pode, dependendo das circunstâncias, correr o risco de parecer sem conteúdo. Assim, os gestores preocupados com redução do impacto ambiental da sua organização não devem limitar os seus esforços para a implementação da norma ISO 14001. Pelo contrário, devem encorajar a diversidade dos indicadores de desempenho e promover ações operacionais concretas e algumas ações gerenciais sem restrições (BOIRAL; HENRI, 2012).

O fluxograma do Programa de Gestão Ambiental conforme a norma ISO 14.001 (BRAGA et al, 2005), está ilustrado na figura 1.

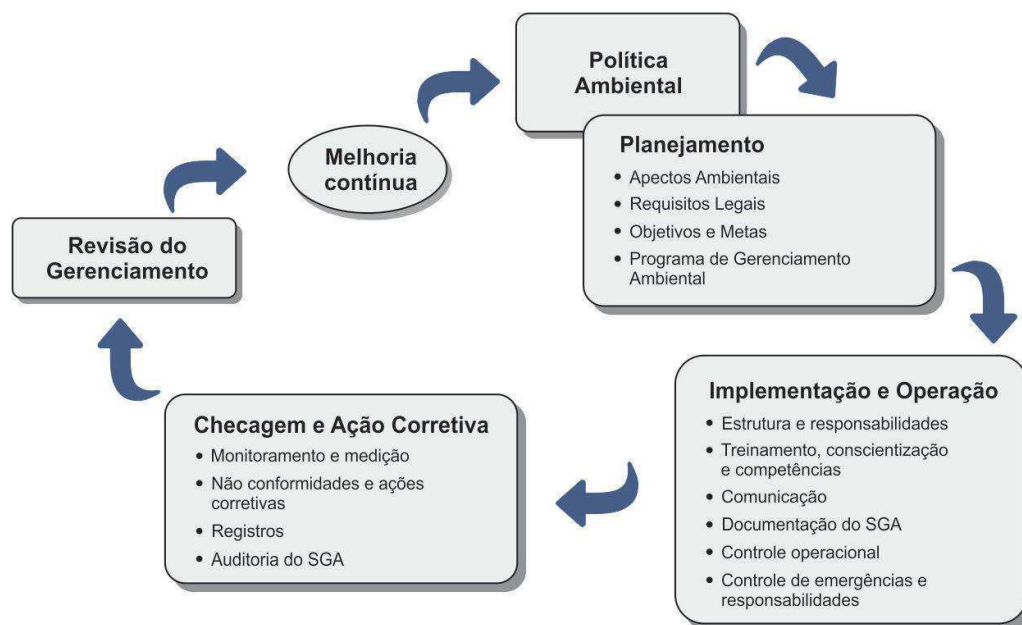


Figura 1: Programa de Gestão Ambiental conforme a norma ISO 14.001 (BRAGA et al, 2005)

No Brasil, a partir dos anos setenta (século XX) observaram-se muitas transformações e o desenvolvimento massivo e tardio de certas atividades industriais. Essas transformações resultaram em consideráveis mudanças na relação com o meio ambiente, o que implicou no crescimento de indústrias mais exploradoras dos recursos naturais e consumo

de energia, tornando-se potencialmente mais sujas, gerando uma forte carga de impactos sobre o meio ambiente. Por outro lado, pesquisas tem apontado que o setor industrial brasileiro, de forma geral, vem demonstrando uma preocupação crescente com a gestão ambiental (BARCELLOS et al, 2008).

Para uma indústria sustentável, não basta boa vontade, ideologia ecológica ou visão ambiental estratégica. É necessário definir uma política de sustentabilidade calcada em soluções técnicas e economicamente viáveis, com metas plausíveis e eficazes, onde as dimensões tecnológica, econômica e política possam avançar (MICHELLIS Jr., 2011).

Verifica-se que o efeito do desempenho ambiental no desempenho empresarial permanece na vanguarda da economia ambiental. Nos últimos anos, várias partes de empresas, tais como governos, organizações não-governamentais, comunidades locais, consumidores, parceiros comerciais, colaboradores, investidores, agências de financiamento, e os acionistas, cada vez mais tornam-se conscientes da gestão ambiental das empresas, especialmente nos países desenvolvidos. Isso influencia direta ou indiretamente o desempenho financeiro das empresas. Por exemplo, se uma empresa viola uma regulamentação ambiental ou provoca um acidente ambiental, a empresa não só tem de pagar multas e penalidades, mas pode sofrer com a perda de confiança e reputação ou um boicote à aquisição de seus produtos. Tais riscos podem ter efeitos negativos sobre a avaliação dos lucros futuros de uma empresa (IWATA; OKADA, 2011).

Embora as relações entre o desempenho ambiental e o desempenho financeiro tenham sido examinadas empiricamente por mais de três décadas, nenhum consenso ainda foi alcançado (HORVATHOVA, 2012).

Pesquisas sobre a relação entre o desempenho ambiental e empresarial não são efetuadas apenas no sentido de analisar o comportamento da empresa, mas também são

importantes do ponto de vista do benefício social. Na literatura econômica, os problemas ambientais tem sido tradicionalmente tratados como inconsistências entre benefícios sociais e privados e tem sido deixados à intervenção governamental para a sua resolução.

No entanto, se o desempenho financeiro está positivamente relacionado ao desempenho ambiental, as empresas têm incentivos para reduzir os danos ambientais. Isto significa que os problemas ambientais podem ser resolvidos pelo mecanismo de mercado sem a intervenção do governo, levando a um ambiente preferível para ambos, as empresas e o governo (IWATA; OKADA, 2011).

Um melhor desempenho ambiental pode ser benéfico para as empresas, uma vez que a poluição é um sinal de ineficiência econômica (PORTER, 1991).

De acordo com uma recente meta-análise sobre os efeitos do desempenho ambiental sobre o desempenho empresarial (HORVATHOVA, 2010 apud HORTATHOVA, 2012), cerca de 15% dos estudos resultaram em efeitos negativos; cerca de 30% dos estudos não encontraram nenhum efeito e 55% dos estudos resultaram em efeitos positivos.

Por outro lado, as análises não explicitam a preocupação com a possibilidade de variação dos efeitos a curto prazo comparados aos de longo prazo e ainda não existem provas suficientes sobre o efeito intertemporal no desempenho ambiental sobre o desempenho empresarial (HORVATHOVA, 2012).

Neste mundo estático, onde as empresas já fizeram as suas escolhas de minimização de custos, a regulamentação ambiental, inevitavelmente, aumenta os custos e tenderá a reduzir a participação de empresas nacionais de mercado nos mercados globais. Entretanto, nos últimos 30 anos, a definição do paradigma de competitividade internacional é dinâmico e vem mudando, baseando-se na inovação (PORTER; van der LINDE, 1995). Os autores, não especificam o efeito em algum horizonte de tempo e sugerem que os efeitos positivos são

mais significativos a longo prazo. Intuitivamente, é claro que pode demorar algum tempo até que as empresas se ajustem às normas e regulamentos ambientais, uma vez que muitas vezes tem de realizar um investimento considerável, a fim de cumprir essas leis.

Uma pesquisa (WALLS; PASCUAL; PHAN, 2007) baseada em uma listagem produzida pela Standard & Poors 500® das maiores empresas nas indústrias primárias e de fabricação, encontrou interações entre as variáveis de governança corporativa, de maneira que não foram detectadas em estudos anteriores. O trabalho explorou a relação entre a governança societária, os conselhos e gestão e suas respectivas interações no desempenho ambiental.

Os resultados mostram que todos os aspectos da governança desempenham um papel no desempenho ambiental. Por exemplo, na dinâmica da propriedade somente o ativismo e a concentração acionista têm um impacto direto sobre o desempenho ambiental. Quando o desempenho ambiental é pobre, as empresas podem esperar um investidor ativista em grande número, possivelmente porque o mau desempenho ambiental pode ser prejudicial para as empresas sob a forma de violações, multas, custos de remediação, e exposição ao risco. Ao mesmo tempo, as empresas com propriedade concentrada têm menor liberdade na busca de desempenhos superiores de conformidade em atividades ambientais, possivelmente devido às providências poderem ser vistas como custos desnecessários.

As considerações ambientais no desenvolvimento de produtos estão sendo vistas como uma parte importante da preocupação ambiental das empresas, uma vez que o desenvolvimento do produto se funde aos mercados atuais, tendências tecnológicas e as exigências regulamentares nas características dos produtos. É claro que este “projeto ecológico” não só diz respeito às fases de desenvolvimento de produtos na sequência da criação da especificação do projeto, mas também às fases que precedem a especificação do

projeto. Isto implica que as questões ambientais devem ser consideradas no início do processo de desenvolvimento do produto (JOHANSSON, 2002).

Quanto aos fatores que influenciam a implementação do “projeto ecológico” nota-se a sua adoção em particular, quando em um setor industrial, as empresas envolvidas em atividades de concepção ecológica são sujeitas a influências externas, por exemplo, influências relacionadas a questões ambientais que se manifestam sob a forma de pressões externas e questões de conformidade legal. Há também influências econômicas provenientes de interesses das partes interessadas e da concorrência. Ainda a diferença que existe entre os defensores de concepção ecológica e aqueles que a têm de executar se confirma como um obstáculo na indústria (BOKS, 2005).

A investigação dos determinantes da introdução de inovações ambientais ganhou impulso nos últimos anos, devido o importante papel que tem sido atribuído às tecnologias verdes como forma de lidar com a crise econômica e, simultaneamente, restaurar a competitividade dos países. Neste debate, a atenção tem sido amplamente focada no papel de restringir marcos regulatórios ambientais como um mecanismo para induzir a geração de tecnologias verdes. Uma regulamentação estrita não é a única força por trás da escolha da adoção de uma cultura empresarial que atribui uma importância crescente para o desempenho ambiental das empresas (QUATRARO & GHISSETTI, 2013)

A regulação pode ser uma influência importante na direção da inovação, seja para melhor ou para pior. A regulamentação ambiental devidamente trabalhada pode servir, pelo menos por seis motivos (PORTER; van der LINDE, 1995). Em primeiro lugar um regulamento sinaliza as empresas sobre as ineficiências de recursos suscetíveis e possíveis melhorias tecnológicas. Em segundo lugar, a regulação focada na coleta de informações pode conseguir grandes benefícios através da sensibilização das empresas. Em terceiro lugar, a regulação

reduz a incerteza se os investimentos para o enfrentamento dos problemas ambientais serão valiosos. Uma maior certeza incentiva o investimento em qualquer área. Em quarto, a regulação cria uma pressão que motiva a inovação e o progresso. Já em quinto lugar, durante o período de transição para soluções baseadas na inovação, a regulamentação garante que uma empresa não pode de forma oportunista ganhar posições, evitando investimentos ambientais. Por último em sexto lugar, faz-se necessária a regulamentação no caso de compensações, já que a inovação nem sempre pode compensar completamente o custo da conformidade.

1.3) O impacto ambiental do setor da construção civil.

A indústria da construção civil e a do ambiente construído são as principais consumidoras de recursos – energia e materiais – e grandes geradoras de resíduos (CIB, 1999; ANDRADE et al, 2004; ORTIZ et al, 2009).

O setor da construção civil em países desenvolvidos, em média é responsável por 8% do Produto Interno Bruto (PIB) e aproximadamente 40% consumo de materiais (sendo 75% dos materiais naturais, muitos deles não renováveis) e 30% dos recursos energéticos (SILVA, 2007; TORGAL; JALALI, 2007). Ainda quanto à emissão de gases do efeito estufa, corresponde a cerca de 32% das emissões humanas (BROWN, 2009).

A produção, transporte e uso de materiais, produtos e componentes de construção contribuem para a poluição gerada para a execução das edificações. Muitos estudos se concentram na eficiência energética e na reutilização de água. Porém uma lacuna vem se abrindo quando se tratam dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos materiais e

sistemas construtivos de um edifício, como por exemplo, a execução das estruturas de concreto armado.

O contexto mundial se caracteriza pela constatação da necessidade de implantação do desenvolvimento sustentável, diante da ameaça de escassez de recursos do meio ambiente, bem como de sua degradação, faz com que a arquitetura tenha a necessidade de se enquadrar, incorporando estas novas variáveis. Desta forma, ao utilizar estes novos elementos os projetos se tornaram muito mais complexos e abrangentes (KRONKA, 2001). Segundo o mesmo trabalho, dentre alguns aspectos a serem incorporados para a realização de uma arquitetura ambientalmente correta e sustentável, uma importante diretriz da fase de projetos é a otimização dos materiais construtivos utilizados, com a minimização das perdas na escolha do sistema construtivo, do dimensionamento do projeto (layout) e da estrutura, bem como da simplificação da geometria do edifício em questão.

O conceito de sustentabilidade na construção tem um significado amplo que engloba: menos ruído, mais rapidez, menor emissão de gases do efeito estufa, menor uso de energia, mais segurança, maior durabilidade, menos produção de entulho, maior reciclabilidade, mais possibilidade de reaproveitamento e maior vida útil, além de menor necessidade de manutenção para o produto final ou para a funcionalidade desejada (HELENE, 2011).

Em síntese, construir sustentavelmente significa construir de forma estável, confiável, energeticamente eficiente e no qual os edifícios fazem sentido, não só do ponto de vista funcional, mas também do ponto de vista de negócio (PINHEIRO, 2008).

No Brasil, o setor do concreto compõe a maior cadeia produtiva da construção civil e seu uso ocorre em praticamente todas as obras do país (TANIGUTI et al, 2013).

A questão para o proprietário, projetista e o público em geral é o que define uma construção ser bem sucedida para o desenvolvimento sustentável. Há muitas perspectivas

sobre a forma de responder a esta pergunta, mas os cinco seguintes itens principais são listados como uma linha de base, juntamente com uma breve discussão de onde o concreto se encaixa neste quadro (SCHOKKER, 2010):

1) Melhorar a funcionalidade: para cumprir sua finalidade, um edifício tem de ser funcional, isto é, ele deve ser apto para o seu uso pretendido. O concreto, como outros materiais de construção estruturais tradicionais, tem uma história de sucesso particularmente porque pode ser moldado em praticamente em qualquer forma;

2) Garantir a longevidade: uma parte integrante de reduzir custo e uso dos recursos é a durabilidade, ou seja, o emprego de estruturas de longa duração. A longevidade do concreto estrutural, devidamente projetado e construído e a sua capacidade de resistir efeitos prejudiciais é bem estabelecida na indústria da construção.

3) Melhorar fatores de ocupação: o ocupante médio gasta a maior parte de seu tempo em ambientes fechados, de modo que o conforto de um ocupante é importante para garantir uma elevada qualidade de vida e de trabalho. O concreto pode desempenhar um papel em temperaturas mais moderadas, reduzindo o uso de substâncias perigosas em superfícies interiores, dada a sua inércia térmica.

4) A redução do uso de recursos: o concreto pode ser fabricado com muitos subprodutos industriais. Mesmo a energia utilizada para produzir o componente chave, o cimento, é frequentemente derivada de materiais que de outra forma acabariam em aterros sanitários. Projetos inovadores podem reduzir a quantidade total de concreto utilizado e reduzir a quantidade de cimento utilizada em cada metro cúbico de concreto. Componentes de concreto podem ser esmagados para reutilização como agregado em concreto novo ou como uma base para a construção nova. O concreto também é tipicamente produzido localmente, reduzindo a necessidade de transporte por longas distâncias.

5) Estética: A estética faz parte da qualidade do ambiente para o público. Além dos benefícios para o indivíduo, um edifício com boa estética pode ser uma fonte de orgulho para a comunidade. Construções belas são feitas de muitos tipos diferentes de materiais, mas as de concreto há muito atingiram a imaginação dos arquitetos e engenheiros. A capacidade do concreto em ser moldado em praticamente qualquer forma o torna particularmente adequado para uma arquitetura inovadora.

O concreto estrutural é um material de construção composto de concreto simples e armaduras de aço – o concreto armado. O concreto simples caracteriza-se por sua razoável resistência à compressão, usualmente entre 20 e 40 MPa, e por uma reduzida resistência à tração, usualmente menor que 1/10 de sua resistência à compressão. Hoje em dia podem ser normalmente empregados concretos com resistências até 50 MPa (FUSCO, 2008).

Considerado como produto básico na indústria da construção civil, o concreto de cimento Portland utiliza em média, em volume, 42% de agregado graúdo (brita), 40% de agregado miúdo (areia), 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos (VALVERDE, 2001).

Apesar de seus conhecidos impactos ambientais, resultantes da sua fabricação, o concreto possui também diversos benefícios reconhecidos. As estruturas de concreto podem durar por séculos com custos de manutenção e reparos muito pequenos e ainda, ao fim de sua vida o concreto pode ser utilizado como agregado (MEHTA, 2001).

Outro fator importante é a absorção de CO₂ com o passar dos anos pelas estruturas de concreto. Algumas pesquisas recentes estimam que os valores de reabsorção seriam de 5% a até 16%, dependendo das condições de umidade, agregados utilizados, alcalinidade, etc., nas estruturas de concreto em contato direto com o ar, enterradas e também submersas, (HASELBACH, 2009) e (YIXIN et al, 2006).

Uma das formas de tornar o concreto um material mais sustentável é por meios que reduzam a extração de calcário e a emissão de CO₂. Todavia, a construção de estruturas que consumam concreto de forma mais racional o tornaria mais sustentável, uma vez que o resultado final seria o mesmo, ou seja, também haveria redução da extração de recursos não renováveis, e o concreto não consumido naquela estrutura facilmente poderia atender o incremento anual da demanda (LEVY, 2005).

Uma forma de se obter estruturas de concreto armado mais racionais, do ponto de vista ambiental, com menor consumo de concreto pode ser objeto de estudo do projeto estrutural, por meio da simulação de modelos com a variação de classes de resistência, dimensões das peças e a relação com o consumo de formas e aço. Uma variação possível em tal análise é que, “para uma mesma edificação podem-se ter vários modelos estruturais o que resultam em diferentes consumos de material. Os consumos de concreto e de aço em um projeto estrutural servem como uma avaliação da solução estrutural encontrada. As referências são poucas; cada escritório de projeto de estruturas, de maneira geral, possui seus próprios índices e consumos referenciais, o que geralmente é ocultado por razões comerciais. As taxas de armadura são indicativos referenciais de consumo. Na falta de referências, uma alternativa é recorrer a uma comparação com os valores mínimos e máximos prescritos na NBR 6118: 2003” (PINHEIRO et al, 2009).

Ao se analisar o processo produtivo tradicional de edifícios de vários pavimentos, executados com estrutura de concreto armado moldada no local, com paredes de vedação e revestimentos convencionais, observa-se que invariavelmente, a execução da estrutura é “caminho crítico” no cronograma de atividades de obra, sendo determinante para o início de quase todos os serviços subsequentes. Quando se analisa o quesito tempo, a execução da estrutura de concreto armado de edifícios multipavimentos consome algo em torno de 50%

do prazo de construção previsto em cronograma. Ainda, a estrutura de concreto armado representa algo em torno de 20% do total do custo de construção e, se considerar o sistema de forma representa entre 25% a 40% do custo total da estrutura, o que ao final representa uma influência no custo total de construção que fica na faixa de 5 % a 8% (ZORZI, 2015).

No desenvolvimento de projetos de estruturas de concreto armado, é comum objetivar-se obter a menor dimensão estrutural dos elementos constituintes da estrutura (pilares, vigas e lajes) e o menor consumo de armadura para resistir aos esforços atuantes. Tal objetivo parte da percepção de que, quanto menor for a quantidade de concreto e aço (que efetivamente ficam permanentes) menor será o custo da estrutura. Entretanto, este tipo de abordagem por parte dos projetistas estruturais negligencia o impacto do custo do sistema de formas, que compõem a estrutura temporária de suporte e que deve ser fabricado e instalado para resistir aos esforços dos materiais permanentes nas primeiras idades. O foco colocado apenas na economia dos materiais permanentes, com pequena ou sem consideração da estrutura temporária (sistema de formas), poderá aumentar o custo da estrutura de concreto armado (PEURIFORY; OBERLENDER, 1995 apud ZORZI, 2015). Estas informações demonstram que também não pode ser mais relegado ao segundo plano o processo de projeto e produção de formas para concreto armado.

1.4) Hipótese da tese.

A hipótese desta pesquisa é a que pode-se obter a melhoria do desempenho ambiental das estruturas de concreto armado pela avaliação, durante a fase de projeto, da utilização de diferentes classes de resistência do concreto, por meio de alterações nas dimensões dos elementos estruturais, bem como do consumo dos materiais componentes da estrutura.

1.5) Objetivos.

O objetivo desta pesquisa é analisar o uso da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no auxílio da tomada de decisões em projetos estruturais de concreto armado, visando a melhoria do desempenho ambiental.

1.6) Objetivos Específicos.

- Análise da viabilidade da utilização da ACV como suporte na tomada de decisões para a execução de projetos estruturais de concreto armado visando a melhoria ambiental;
- Verificação de qual (ou quais) classes de resistência apresentam os melhores resultados do ponto de vista ambiental;
- Obtenção das taxas de concreto, aço e formas que atendam os objetivos de melhor desempenho ambiental;
- Avaliação dos custos econômicos da estrutura nas diferentes classes de resistência;
- De posse dos resultados da ACV, a realização de comentários e orientações que norteiem, além dos projetistas de estruturas, os demais agentes participantes das fases de projeto e execução, para a obtenção do sucesso pretendido quanto ao melhor desempenho ambiental das estruturas de concreto armado.

2. MATERIAIS COMPONENTES DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E SEUS PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS.

A seguir são listados os principais componentes das estruturas de concreto armado com algumas considerações quanto aos seus impactos ambientais e acerca da durabilidade das estruturas.

2.1) Cimento Portland.

O cimento Portland é o aglomerante essencial para a fabricação de concreto. Os principais impactos ambientais da produção de cimento estão relacionados às seguintes categorias (KARSTENSEN, 2006):

- a) Emissões de material particulado de chaminés e poeiras fugitivas.
- b) Emissões atmosféricas dos gases NO_x , SO_2 , CO_2 , compostos orgânicos voláteis (VOCs) e outros.
- c) Outras emissões como ruído e vibrações, odores, água de processo, geração de resíduos, etc.
- d) Consumo de recursos naturais como energia e matérias-primas.

A fabricação de cimento resulta na emissão de CO_2 , contribuindo com aproximadamente 5% das emissões humanas globais, geradas pela reação química da calcinação do calcário e a combustão dos combustíveis fósseis utilizados nos fornos, (WBCSD, 2009). Para cada tonelada de cimento produzida, são liberados perto de 1,0 tonelada de CO_2 para a atmosfera (HOOTON; BICKLEY, 2011); (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Por outro lado, mais do que a redução das emissões por tonelada de cimento produzida é importante considerar

as emissões por m³ de concreto produzido em uma dada classe de resistência, que, para fins práticos, deve ser considerada na validação dos balanços de redução das emissões de CO₂ (SUMNER et al, 2008), devido a variação da quantidade de cimento no traço e volume de concreto utilizado. Os cimentos com adições e o coprocessamento na produção de cimento são uma opção compatível com a atual política mundial de preservação de recursos naturais e energéticos, apresentando-se como uma das alternativas mais seguras e eficientes para a destinação/destruição de resíduos.

Noventa por cento da energia incorporada ao concreto é atribuída ao cimento Portland (HOOTON;BICKLEY, 2014). Aditivos para o cimento (definidos como produtos colocados no clínquer, durante o processo de fabricação do cimento) podem diminuir diretamente o consumo elevado de energia desfavorável ao ambiente, graças aos materiais auxiliares de moagem - fazendo com que o processo de moagem se torne mais eficiente, e, graças ao chamados ativadores, que acelerando o desenvolvimento da resistência do clínquer e ainda a redução da composição do clínquer de cimento Portland com a substituição por adições (principalmente cinzas volantes e escória de alto-forno),resultando na diminuição do impacto das emissões de CO₂ (ORTEGA, 2006).

O apelo por produtos sustentáveis incentivou a produção de cimentos para a construção civil com adição de subprodutos. A maioria dos concretos no Canadá e nos Estados Unidos da América contém alguma quantidade de pozolana ou escória de alto forno em substituição de parte do cimento Portland (HOOTON; BICLEY, 2014). O caminho mais efetivo para a redução de impacto ambiental do concreto é a substituição do cimento Portland por materiais cimentícios adicionais, os quais possuem consideráveis implicações na durabilidade (CHROMÁ et al, 2007; TEPLÝ; NOVÁK, 2013).

No Brasil, esses cimentos, que recebem adições, são certificados e obedecem às normas de produção, tal como acontece com o CP III, que é produzido com a adição de até 70% de escória de alto forno (ABCP – BT-106, 2002) e será o utilizado na avaliação desta pesquisa.

2.1.1) Cimentos Portland com adições minerais.

O uso de adições minerais na construção civil é anterior à invenção do cimento, tendo iniciado no período de 1500 a.C., na Grécia, onde se adotava um material de origem vulcânica, originado de erupções ocorridas na ilha de Santorini (MALHORTA; MEHTA, 1996). Essas adições difundiram-se por todo o império romano para execução de várias obras; os territórios situados à volta do monte Vesúvio eram a principal fonte das cinzas vulcânicas utilizadas (VITRÚVIO, 2007).

Posteriormente, visando suprir o mercado em locais onde a cinza vulcânica não estava disponível, surgiram outras adições, como a da argila calcinada. Nos dias atuais, as adições minerais normalmente utilizadas são os resíduos provenientes de outras indústrias, os quais seriam normalmente descartados em grandes quantidades em locais impróprios.

Assim, a busca por materiais e formas de energias que produzam menos agressividade ao meio ambiente e sejam economicamente viáveis, tem direcionado as várias pesquisas para o uso de adições minerais, além do uso das mesmas proporcionar uma melhora nas características do cimento e na durabilidade do concreto (BJEGOVIĆ; ROSKOVIĆ, 2005).

Os cimentos compostos, que contém de 15% a 20% de cinza volante ou de 30% a 40% de escória, em massa, já são usados mundialmente pela indústria do concreto. Na Europa, as misturas de concreto contendo escória e cimento Portland com 50% a 70% de escória de alto-

forno são muito conhecidas pela durabilidade. Estima-se mundialmente o fator clínquer (proporção de clínquer por tonelada de cimento) seja de 0,86. O Brasil se destaca no cenário mundial por seu pioneirismo no uso de adições minerais desde a década de 60. O fator clínquer no Brasil foi da ordem de 0,60 registrado em 2007, um dos mais baixos do mundo, (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Na busca da diminuição do consumo energético na produção do cimento, uma das alternativas de sucesso foi o uso da adição de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos, respectivamente. O quadro 1 apresenta composição desses tipos de cimento normalizados no Brasil (ABCP – BT-106, 2002).

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Quadro 1: Composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos (ABCP-BT-106, 2002)

Segundo a ABCP-BT-106 (2002), as escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, isto é, da forma como são obtidas, endurecem quando misturadas com água. Contudo, as reações de hidratação das escórias são tão lentas que limitariam sua aplicação prática se agentes ativadores, químicos e físicos, não acelerassem o processo de hidratação.

A portlandita liberada durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando esta é adicionada ao cimento, ao passo que a ativação física é conseguida pelo aumento da finura quando a escória é moída separada ou conjuntamente com o clínquer.

Os materiais pozolânicos, segundo a mesma publicação, ao contrário das escórias granuladas de alto-forno, não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem aos compostos com propriedades aglomerantes.

Dentre os materiais pozolânicos mais comumente encontrados estão: cinzas vulcânicas – a pozolana original – pumicita, opalina, micas e calcedônias, terras diatomáceas calcinadas e argila calcinada (NEVILLE, 1997).

A palha de arroz é um resíduo natural e há interesse no seu uso no concreto. A palha de arroz tem um alto teor de sílica e com tratamento a uma temperatura entre 500°C e 700°C, resulta em um material amorfo com uma estrutura porosa.

A cinza volante, também conhecida como cinza volante pulverizada, é a cinza obtida por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases da exaustão de estações alimentadas por carvão; é a pozolana artificial mais comum.

O sílica ativa, também denominado microssílica, é um subproduto da fabricação de silício ou de ligas de ferrosilício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em forno elétrico de eletrodos de arco submerso. O SiO se desprende na forma de gás, se oxida e se condensa na forma de partículas esféricas extremamente pequenas de sílica amorfa (SiO₂); por esta razão o nome de fumo de sílica (ibid).

É consenso que as adições minerais contribuem no sentido de reduzir tanto a penetração por cloretos como a entrada de umidade e oxigênio no interior do concreto, aumentando a sua resistividade e contribuindo na prevenção da corrosão das armaduras desencadeada por cloretos, (DAL MOLIN, 2005).

Concretos com adições de escória de alto-forno ou com adições de materiais pozolânicos, tais como cinza volante ou sílica ativa, apresentam microestrutura na pasta mais

compactas e, portanto, os desempenhos desses concretos quanto à penetração de líquidos, gases e íons, são consideravelmente melhores se comparados aos concretos de cimento Portland comum (CASCUDO, 1997).

A resistência quanto à ação de cloretos pode ser melhorada graças à baixa difusão do concreto obtida (CEB Design Guide – Durable Concrete Structures, 1992).

Quanto à corrosão da armadura, desencadeada por carbonatação na presença de adições minerais, não existe consenso devido os resultados contraditórios de seu comportamento. Algumas pesquisas concluem que os cimentos com adições apresentam um desempenho inferior aos cimentos Portland puros em igualdade de condições de ensaios, no que se refere à resistência a carbonatação (FIGUEIREDO, 2005; CUNHA; HELENE, 2001; ANDRADE et al, 1993; BOURGUIGNON, 2004).

Outros estudos salientam o desempenho contrário, isto é, superior dos cimentos com adições minerais frente à ação da carbonatação em relação aos cimentos Portland puros (GENTIL, 1996; MORANVILLE-REGOURD, 2004), ou que cada tipo de cimento exige diferentes cuidados com a cura, o que pode ocasionar, no caso de cimentos com adições minerais, a levar, por exemplo, um certo tempo para que comecem a reagir pozolanicamente, o que resultaria a um refinamento dos poros e um aumento de um efeito barreira contra a penetração do dióxido de carbono (CEB/BI 152, 1984; FIGUEIREDO, 2005).

Em uma análise do estado-de-arte de ensaios de carbonatação acelerada pelas pesquisas no Brasil observa-se que além de outras variáveis que influenciam nos resultados dos ensaios, é destacado que se deve levar em conta que materiais com adições pozolânicas requerem maior tempo de cura para o desenvolvimento das reações (cerca de 28 dias para o seu início) e que eles seriam desfavorecidos com períodos curtos de cura, aspecto que merece reflexão. Essa discrepância entre os tempos e o tipo de cura deve ser considerada quando se

pretende fazer correlações entre os diversos trabalhos, visto que a cura interfere na microestrutura do concreto e, conseqüentemente, as variações decorrentes dos processos irão interferir no avanço da frente de carbonatação do concreto. Outro fator de importância é a idade de exposição ao CO_2 , concretos produzidos com adições minerais, em relação aos sem adições, demandam maiores tempos para se hidratar, logo quando um ensaio é iniciado antes desse período, as reações de hidratação ainda estão em desenvolvimento e, obviamente, a microestrutura desse material é distinta (DAL MOLIN; PAULETTI; POSSAN, 2007).

Estes resultados acontecem devido ao efeito inverso da redução da porosidade capilar (com conseqüente diminuição da carbonatação) e diminuição de Ca(OH)_2 livre que foi consumido nas reações pozolânicas com as adições minerais (sendo importante por ser responsável pela reserva alcalina que impede a despassivação do aço) (DAL MOLIN, 2005). Ainda com relação a carbonatação, os casos dos efeitos da escória de alto-forno são dois. Em primeiro lugar, devido à pequena quantidade de hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento hidratada, o CO_2 não se fixa nas proximidades da superfície do concreto, de modo que não ocorre o bloqueio dos poros pela formação de carbonato de cálcio. Em conseqüência, nas primeiras idades, a profundidade de carbonatação é significativamente maior do que em concretos com cimento Portland sem adições. Em segundo lugar, ao contrário, a baixa permeabilidade de concretos com escória de alto-forno bem curados, impede um aumento continuado da profundidade de carbonatação. Por esse motivo, exceto quando é muito elevado o teor de escória de alto-forno, não há risco de corrosão da armadura devida à redução da alcalinidade da pasta de cimento hidratada e da despassivação do aço (NEVILLE, 1997). Em outra pesquisa, os resultados mostraram que o pH de uma solução aquosa de cimento CEM I (clínquer) é 13,9 e a de um cimento CEM III com 80% de escória e

20% do mesmo clínquer é de 13,1. O uso de escória, portanto, embora reduza um pouco o pH, não chega a prejudicar a camada passivadora das armaduras (MORANVILLE-REGOURD, 2004).

Ainda especificamente quanto à escória de alto-forno, sua hidratação não leva à formação de portlandita, podendo-se esperar uma leve diminuição do pH do líquido intersticial, porém o seu pH é suficiente para garantir a estabilidade da camada passiva (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

2.2) Agregados.

Quanto aos agregados para a indústria da construção civil estes são os insumos minerais mais consumidos no mundo, (VALVERDE, 2001). Os agregados ainda apresentam custos relativamente baixos e são em geral inertes, não entram em reações químicas com a água, como acontece com o cimento. A brita representa em média 2% do custo global de uma construção e 60% do seu volume. O consumo per capita de agregados para a construção civil (areia e brita) no Brasil se mantém estável, em torno de 2 toneladas per capita ao ano. O volume ainda é muito reduzido se comparado com os países europeus mais desenvolvidos e com os Estados Unidos, (ALMEIDA; LUZ, 2012).

O concreto ordinário contém tipicamente ao redor de 80% de agregados em massa. Globalmente para a confecção de concreto, são consumidos areia e brita à taxa de 10 a 11 bilhões de toneladas a cada ano. A extração, processamento, e operações de transporte envolvendo estas grandes quantidades de agregados consomem consideráveis quantidades de energia e efeitos desfavoráveis ao ambiente de áreas florestais e leitos de rios são uma consequência imediata (MEHTA, 2001).

De fato, poucas pesquisas tem sido efetuadas relativas ao impacto ambiental decorrente do consumo de areia e agregado. Desde que o concreto e seus constituintes não sejam transportados por longas distâncias, a escala regional é uma escala mais relevante sobre as quais as políticas de extração de recursos deveriam se basear (HEED; BELIE, 2012).

2.3) Água.

A indústria do concreto também utiliza grandes quantidades de água fresca. A água utilizada na mistura, sozinha, é responsável pelo consumo de 1 trilhão de litros a cada ano, (MEHTA, 2001). Estimativas confiáveis não estão disponíveis, mas grandes quantidades de água ainda são usadas na indústria em limpeza e na cura do concreto.

Estima-se que, em média, cada caminhão de concreto retorna com aproximadamente meio metro cúbico de concreto e depois que este é descarregado permanecem ao redor de 300kg de sólidos (cimento, areia e brita) que são lavados com aproximadamente 1000 litros de água (BREMNER, 2001).

Convém destacar que ocorre um retorno da água consumida ao sistema ambiental, tanto pela retração por secagem quanto pela deformação por fluência, que dependem quantitativamente da dosagem, do teor de pasta de cimento hidratada, de características dos agregados, da geometria dos elementos de concreto, do tempo e da umidade relativa do ar, da temperatura de exposição e a magnitude da tensão aplicada (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

2.4) Aditivos.

Ao lado dos três componentes primários: cimento, agregados e água, numerosos aditivos químicos e minerais são incorporados às misturas de concreto.

Por exemplo, a quantidade de CO₂ emitida para a produção de 1kg de superplastificante é apenas um pouco menor do que as emissões de CO₂ associadas com a produção de cimento. O mesmo se aplica para as emissões de NO_x. Por outro lado, a quantidade de SO_x emitida na fabricação de aditivos é significativamente maior. Entretanto, como a quantidade de superplastificante usada no concreto é quase negligenciável quando comparada com o teor de cimento, estas emissões não deveriam contribuir significativamente no impacto ambiental global (HEED; BELIE, 2012).

2.5) Aço.

A indústria do aço tem grande impacto para a economia e sobre a sociedade como um todo. Enquanto em países europeus, a média de consumo per capita passa de 400 kg/habitante, no Brasil se manteve em torno de 100 kg nos últimos 30 anos, indicador que mostra a possibilidade de crescimento do mercado interno de aço para o desenvolvimento econômico do país (IAB, 2013).

Em todo o mundo, duas principais rotas tecnológicas segmentam os processos de produção de aço nas usinas: unidades industriais integradas e unidades industriais semi-integradas. As usinas integradas produzem aço a partir da fabricação de ferro-gusa líquido em seus altos-fornos. O coque é o elemento redutor comumente utilizado na maior parte das usinas. No Brasil, entretanto, parte da produção utiliza o carvão vegetal como redutor. Gera

menor emissão de gases do efeito estufa se comparado ao processo tradicional, mas possui, limitações técnicas e operacionais que restringem sua aplicação em maior escala de produção. Já as usinas semi-integradas produzem aço a partir da fusão de metálicos (sucata, gusa e/ ou ferro-esponja) em aciaria elétrica. Algumas usinas possuem, ainda, um processo híbrido e associam o uso de aciarias elétricas com altos-fornos a carvão vegetal (IAB, 2013).

Pode-se usar somente uma das matérias primas ou uma combinação delas. O minério de ferro representa 35% da participação por tonelada de aço produzido. Para a produção de uma tonelada de gusa, usa-se o minério de ferro equivalente a 1,68 toneladas (granulado ou sinterizado), o carvão vegetal com cerca de 3m³ ou o coque de carvão mineral em torno de 500 quilos, além do calcário e dolomita como escorificante e para ajustar o teor de sílica o quartzito ou quartzito granulado (MME, 2009).

O uso da sucata, depende da qualidade do ferro velho que deve ser livre de impurezas prejudiciais à aciaria.

A fabricação comporta duas fases essenciais e sucessivas oxidação e redução. Na fase de oxidação são eliminados carbono (C), sílica (Si) manganês(Mn) e enxofre (S) parcialmente. E a fase de redução inclui a dessulfurização e a desoxidação do ferro. Quanto ao volume de água usada no processo industrial das plantas siderúrgicas, o índice de uso específico de água é de 10,5 m³ de água por cada tonelada de aço bruto produzida (ibid.).

A indústria de siderurgia, responsável pela produção de aço, também é grande geradora de dióxido de carbono. A média mundial de liberações de CO₂ é de 1,9 toneladas para cada tonelada de aço produzido. O ferro e o aço produzidos pela indústria contribuem com aproximadamente 4% a 5% do total de emissões de CO₂. Mais de 1,3 bilhões de toneladas de aço são fabricadas todo ano. Cerca de 50% do aço é produzido e utilizado na China (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2011).

Segundo o American Institute of Steel Construction, o aço tem sido considerado o principal material de construção verde e a indústria de aço continua a melhorar a sua posição de liderança como um produto amigavelmente ambiental, reduzindo ainda mais as emissões de gases de efeito estufa. Enquanto inúmeros esforços legislativos e regulamentares nos últimos anos têm como alvo as emissões, eficiência energética, e as preocupações ambientais relacionadas, a indústria de aço tem sido proativa na busca de medidas próprias que normalmente excedem os requisitos regulamentares. Os resultados dos esforços estruturais da indústria do aço são evidentes nos últimos relatórios da Agência de Proteção Ambiental (EPA) nos Estados Unidos. As conclusões quanto à emissão de gases de efeito estufa mostram que a indústria de ferro e aço reduziu as emissões de carbono em 47% entre 1990 e 2005, e alcançou a maior redução global das emissões de qualquer grande indústria - 67%. Em comparação, iniciativas como o Protocolo de Kyoto, teria exigido das indústrias dos EUA a redução nas emissões em 5,2% até 2012, (AISC, 2013).

A construção civil no ano de 2012 foi responsável pelo consumo de 37,7% da produção de aço no Brasil, conforme informa o gráfico da figura 2 (IAB, 2014).

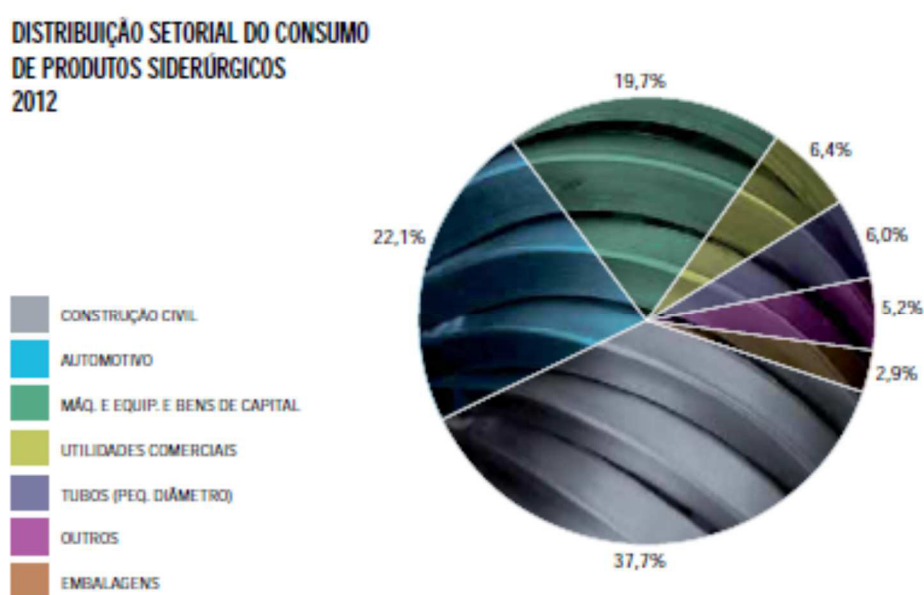


Figura 2: Distribuição Setorial do consumo de produtos siderúrgicos (IAB, 2014).

O aço figura entre os materiais mais recicláveis e reciclados do mundo. O setor estimula a coleta e recicla o aço contido nos produtos no final da vida útil, empregando-o na fabricação de novos produtos siderúrgicos, sem qualquer perda de qualidade (IAB, 2009). Atualmente, 95% do aço dos vergalhões produzidos no Brasil vêm de reaproveitamento de sucata, oriunda sobretudo de navios antigos e processados em aciarias (Téchne, 2001).

2.6) Madeira para formas.

A forma é o molde provisório que serve para dar ao concreto fresco a geometria e textura desejada. Cimbramento é o conjunto de todos os elementos que servem para sustentar o concreto fresco até que atinja a resistência suficiente para auto suportar os esforços que lhe são submetidos (LAHR, 2007).

Por meio do levantamento de dados em obras de três empreendimentos residenciais da Construtora Cyrela São Paulo (com 21 a 22 pavimentos tipo), para os pavimentos tipo dessas três obras, foram encontrados os valores de índices representativos de $2,0\text{m}^2$ a $2,2\text{m}^2$ de área de formas e a área de projeção total do pavimento tipo (ZORZI, 2015).

Outros índices encontrados, no caso de formas comuns de tábuas ou madeira compensada, são os coeficientes médios por m^2 de forma de $4,5\text{m}/\text{m}^2$ de tábuas ($0,3\text{m} \times 0,025\text{m}$), $1,5\text{m}/\text{m}^2$ de sarrafos ($0,1\text{m} \times 0,025\text{m}$) e $3,0\text{m}/\text{m}^2$ de pontaletes ($0,075\text{m} \times 0,075\text{m}$). Em geral, as tábuas e sarrafos são reaproveitados de duas a cinco vezes e os pontaletes de quatro a oito vezes (GIAMUSSO, 1988).

A análise da procedência de produtos de madeira é de fundamental importância para as avaliações de sustentabilidade ambiental (KUHN, 2006). No Brasil, visto que não é verificada a disponibilidade de madeira certificada para a construção civil, considera-se que

não existe uma alternativa segura de madeira para formas e cimbramento. O único fator disponível que pode ser levado em consideração quanto à magnitude dos impactos da utilização é o transporte da madeira até o local da confecção das formas e impacto que esta causa ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2007).

A exploração ilegal de madeira ainda é um grande problema no Brasil, e a Floresta Amazônica é a principal área afetada por esta atividade. Estima-se que 80% da extração anual de madeira da região seja de origem ilegal. O Estado de São Paulo consome cerca de 25% da madeira extraída da Amazônia, e destes, 70% é consumido pelo setor da construção civil (SISTEMA AMBIENTAL PAULISTA – GOVERNO DE SP)

Outro fator a ser considerado é que, para atingir o mercado consumidor, a madeira nativa serrada, originária da Amazônia acompanhada de Documento de Origem Florestal (DOF) do Ibama é transportada no Brasil em longas distâncias pelo modal rodoviário. Grande parte do volume de madeira serrada, com origem na Amazônia, percorreu entre 1.500 e 3.000km, a distância média de transporte, ponderada pelo volume, entre os registros assumidos como rodoviários quantificados foi de 1956 km. A emissão de CO₂, em gramas, por tonelada de madeira e quilômetro percorrido situa-se entre 12,8g de CO₂/t.km e 50,6g de CO₂/t.km, dependendo do tipo de caminhão de carga (ibid.).

2.7) Outros fatores em projeto e produção de estruturas de concreto armado.

Somadas aos itens anteriores, as operações de fabricação do concreto - mistura, transporte, lançamento, adensamento e processos de cura – ocorre o consumo de grandes quantidades de energia.

Outro fator importante quando da decisão técnico- econômica ou técnico-sustentável, é relativo às dimensões das peças. A definição das dimensões destas resultam de imediato, em diferentes taxas (maiores ou menores) de armadura por m³ de concreto na estrutura. Tal fato altera de maneira significativa o consumo dos materiais para a sua execução e consequentemente os impactos ambientais devido à produção dos mesmos.

Por exemplo: apesar de permitidas, bases de seções de vigas 12cm de largura (NBR 6118:2014), as seções maiores, com 14cm mostraram-se mais econômicas quando da avaliação global dos custos da construção (PINHEIRO, 2008).

Por outro lado, ao menos no caso de vigas, resultados obtidos de estudo em Portugal (CARVALHO et al, 2005) com a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), indicam que à medida que a porcentagem de aço utilizada aumenta, os impactos ambientais e custos econômicos diminuem.

Também por meio da ACV na avaliação ambiental de pontes de concreto armado com o uso de concretos de alta resistência, os benefícios obtidos foram de uma redução em torno de 50% na emissão de gases de efeito estufa (ARRIBE et al, 2012).

A importância em se contemplar na análise os parâmetros da estrutura em conjunto com a produção e custo ambiental dos materiais é flagrante.

3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que possibilita a análise ambiental desde a extração dos recursos naturais ao descarte final de um produto, processo ou atividade (SOARES et al, 2004; CYBIS ; SANTOS, 2000). É um procedimento sistemático para mensurar e avaliar os impactos que um produto ou material causa no meio ambiente e sobre a saúde humana (OLIVEIRA, 2007).

Constituindo-se em uma técnica de gestão ambiental, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) visa mensurar os aspectos ambientais e impactos potenciais de um produto, serviço ou de um sistema, desde a aquisição de suas matérias primas até a sua disposição final, uma vez descartado. Esta técnica permite a identificação de ocasiões propícias para intervir no ciclo de vida de um produto objetivando a melhoria de qualidade ambiental. Esta ferramenta baseia-se no conceito de que se os impactos ambientais de um produto ou serviço forem conhecidos, decisões mais acertadas poderão ser tomadas em relação aos fatores ambientais desse produto ou serviço. Assim a mesma pode ser utilizada na tomada de decisões de iniciativas privadas, órgãos governamentais e não governamentais e também no marketing empresarial, pois viabiliza declarações e rotulagens ecológicas (DAIANA; GIL; MANUEL, 2010).

As abordagens com o uso de ACV foram desenvolvidas para apoiar a gestão ambiental dos produtos. Elas tentam capturar os efeitos ambientais de um produto, processo, serviço, etc., durante o seu ciclo de vida completo do "berço ao túmulo" (ou "terra a terra"). Com este foco, a ACV é muitas vezes vista como a principal ferramenta para a definição de critérios em matéria de rotulagem ecológica (SCHALTEGGER, 1996).

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta fundamental para medir o impacto ambiental de medidas que visem reduzir a quantidade de recursos naturais incorporada à

produção de bens materiais; introdução de esquemas de certificação e rotulagem; identificação de oportunidades para reciclagem e redução de cargas ambientais nos processos (SILVA; JOHN; AGOPYAN, 2001).

Uma das particularidades da ACV como um campo de pesquisa é a forte relação entre pesquisa, normas e regulamentos. Isso está ligado à história do método: antes de se tornar um domínio de investigação completa, que foi introduzido pela primeira vez e utilizado por indústrias, o método foi então padronizado em cooperação com pesquisadores e as normas, fornecendo princípios básicos, o que tem levado aos muitos novos desenvolvimentos da investigação. Isto é realmente original: em muitos outros domínios científicos (como materiais de construção), as normas são muitas vezes posteriores aos avanços científicos. Outra particularidade da ACV é sua característica de interdisciplinaridade (VENTURA, 2012).

Os primeiros estudos que são agora reconhecidos como de ACVs datam partir do final de 1960 e início de 1970. O escopo desses estudos foi inicialmente limitado a análises de energia e mais tarde foi ampliado para abranger às necessidades de consumo de recursos, cargas de emissões e resíduos gerados (GUINÉE, 2012). O período 1970-1990 compreendeu as décadas de concepção da ACV com abordagens, terminologias e resultados amplamente divergentes. Durante os anos 1970 e 1980, as ACVs foram realizadas por métodos diferentes e sem um quadro teórico comum (Ibid.).

A década de 1990 viu um notável crescimento das atividades científicas e de coordenação em todo o mundo, o que se reflete no número de workshops e outros fóruns que foram organizados neste período e na quantidade de guias de ACV e manuais produzidos pela Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química (SETAC). Ao lado do SETAC, a International Organization for Standardization (ISO) vem desenvolvendo a ACV desde 1994. Enquanto os

grupos de trabalho do SETAC focaram o desenvolvimento e harmonização de métodos, a ISO adotou a tarefa formal da padronização de métodos e procedimentos (GUINÉE, 2012)

A primeira década do século 21 tem mostrado uma atenção cada vez maior a ACV. Em 2002, o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP) e da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) lançou uma parceria do Ciclo de Vida Internacional, conhecida como Iniciativa do Ciclo de Vida.

O período compreendido entre 2000 e 2010 pode ser caracterizado como a década de elaboração. Enquanto a utilização da ACV aumenta, o período atual é caracterizado por uma divergência de métodos novamente. Como a ISO nunca teve como objetivo padronizar métodos de ACV em detalhes e como não há consenso sobre a forma de interpretar alguns dos requisitos da ISO, as abordagens divergentes têm sido desenvolvidas em relação aos limites do sistema e métodos de alocação, dinâmica da ACV, ACV espacialmente diferenciado, etc. Além disso, abordagens têm sido propostas e / ou desenvolvidos quanto ao ciclo de vida de custeio (CCV) e avaliação do ciclo de vida social (ACVS).

Muitos desses recentes desenvolvimentos da ACV foram iniciados para ampliar e aprofundar a ACV ambiental tradicional para uma análise mais abrangente de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV). A estrutura amplia principalmente o escopo da atual ACV de impactos ambientais, para cobrir todas as três dimensões da sustentabilidade (pessoas, planeta e prosperidade) (GUINÉE, 2012).

A ACV é hoje normalizada por um conjunto de normas da série ISO 14040. No Brasil, a NBR ISO 14040 estabelece os princípios e estrutura (ABNT, 2009), a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) determina os requisitos e orientações. No plano internacional, as quatro normas citadas, são acrescentadas a ISO/TR 14047 (ISO/TR, 2003), que apresenta exemplos de aplicação, a ISO/TS 14048 (ISO/TS, 2002), que considera o formato de apresentação de dados,

e, finalmente, a ISO/TR 14049 (ISO/TR, 2000), que fornece exemplos de aplicação especificamente à definição de objetivos (SOARES et al, 2006).

3.1. Descrição Geral da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

De acordo com a norma NBR 14040: 2009 - Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura, a ACV deve incluir a (1) definição de objetivo e escopo, (2) elaboração do Inventário do Ciclo de Vida, (3) avaliação de impactos (AICV) e (4) interpretação de resultados, conforme ilustrado na Figura 3.

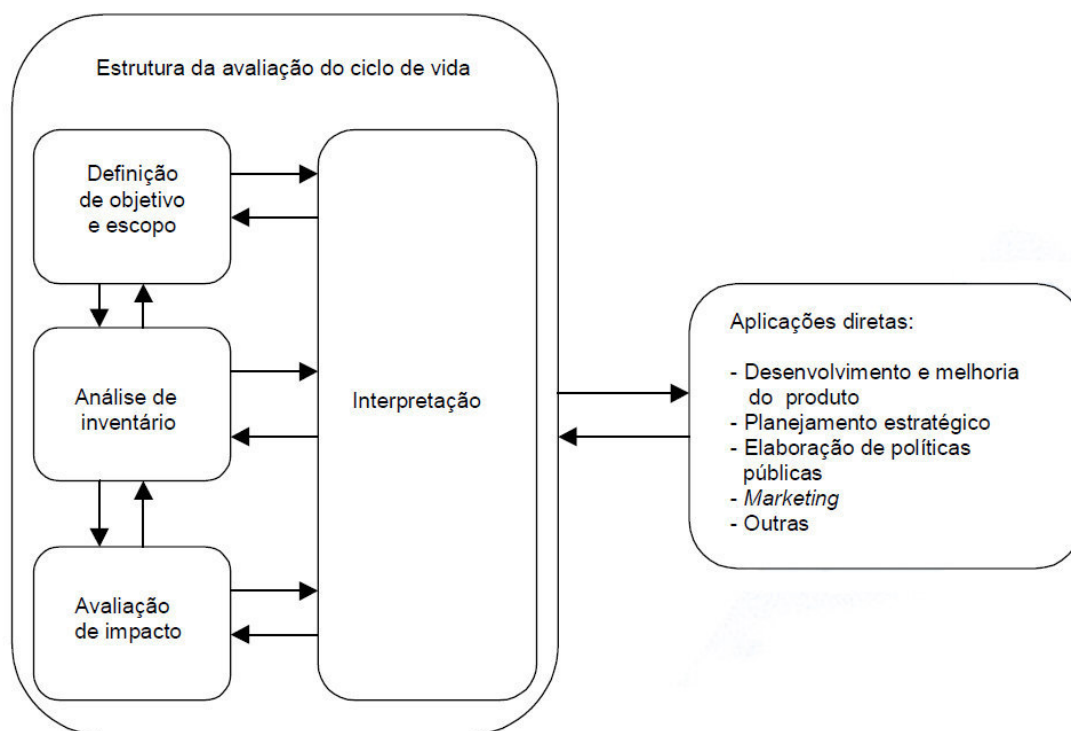


Figura 3: Etapas da ACV e suas interações NBR 14040 (2009).

3.1.1 Definição do Objetivo e Escopo

O primeiro passo de uma ACV resume-se à definição do objetivo e a definição do escopo. A definição do objetivo é a primeira fase de qualquer ACV, onde seis aspectos devem ser coletados e documentados durante a definição do objetivo (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010):

- A aplicação pretendida, sem ambiguidades, das entregas e resultados;
- Limitações do método: limitações da cobertura do impacto, limitações metodológicas, limitações específicas ou incomuns;
- Razões para a tomada de decisão de efetuar o estudo. Explicar as razões internas ou externas para a execução do estudo e as decisões específicas a serem sustentadas;
- Público alvo do estudo: identificação do público ao qual os resultados do estudo se destinam
- Estudos comparativos abertos ao público.
- Identificação dos responsáveis pelo estudo, financiadores e outros agentes influenciadores.

Durante a fase de definição do escopo o objeto de estudo da ACV deve ser identificado e definido em detalhes. Isto deve ser feito em consonância com a definição do objetivo do estudo.

Quando prover o escopo de um ACV de um objetivo de estudo, considerar e descrever de forma clara os seguintes itens que devem ser atendidos (os quais estão de acordo com a Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental -ABNT/CB-38) (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010):

- O tipo de provisão do estudo de ACV/ ICV, de acordo com a aplicação pretendida;

- O sistema ou processo a ser estudado e sua função, unidade funcional, e fluxo de referência;
- Estruturação de modelo e gestão de processos e produtos multifuncionais;
- Fronteiras do sistema, completeza, e relação de regras de corte,
- As categorias de impacto a serem cobertas e seleção de métodos de AICV a serem aplicados,
- Outros requisitos de qualidade que abranjam a cobertura temporal, cobertura geográfica e a cobertura tecnológica,
- As fontes dos dados, qualidade, bem como a incerteza das informações, e sua representatividade.
- A identificação de necessidades críticas e, por fim
- O Relatório de planejamento dos resultados

Pode-se dizer que o escopo é então uma das etapas mais importantes de ACV e serve para especificar quais unidades de processos serão avaliadas e qual será a unidade funcional.

A função e a unidade funcional são elementos centrais de um ACV. Sem eles, o significado e a validade de comparação, especialmente de produtos não é possível. Uma ACV é embasada em uma precisa, descrição quantitativa da função fornecida do sistema analisado. Isto é geralmente feito com o uso de uma unidade funcional que nomeia e quantifica os aspectos qualitativos e quantitativos da função.

Logo na definição do escopo uma decisão importante deve ser tomada quanto a princípios de modelagem e métodos de aproximação de uma ACV: um modelo atribucional ou consequential e alocação ou expansão do sistema/ aproximações de substituição. Isto terá implicações em muitas das outras escolhas posteriores incluindo quais dados de inventário deverão ser coletados ou obtidos.

Os dois princípios de modelagem atribucional e consequential representam por sua lógica as duas diferentes situações fundamentais de modelagem do sistema analisado.

A modelagem atribucional descreve os impactos potenciais ambientais que podem ser atribuídos a um sistema (por exemplo um produto) sobre a sua ACV. Modelos atribucionais fazem uso de registros históricos, fatos embasados, dados de medição de conhecidas incertezas, e incluem todos os processos que são identificados como relevantes contribuições para o sistema a ser estudado. O sistema existente ou previsto é incorporado em uma tecnosfera estática. O modelo retrata a cadeia de fornecimento real ou prevista, específica ou média, bem como a utilização e fim de vida da sua cadeia.

Os termos tecnosfera e ecosfera são centrais. Querem dizer frequentemente e percebe-se que estes dois termos são interpretados diferentemente por profissionais diferentes: na NBR ISO 14044:2009 -Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações, a ecosfera se refere ao “ambiente” o que pode se tornar confuso na prática de ACV, por exemplo também edifícios e barragens são referidos como “ambientes fabricados pelo homem” (NBR ISO 14044: 2009) . Em adição, os fluxos elementares que cruzam a fronteira do sistema são definidos como “material ou energia de entrada do sistema que está sendo estudado, que foi absorvido pelo meio ambiente sem a prévia transformação humana, ou material ou energia que deixa o sistema em estudo que é liberado no meio ambiente sem a subsequente transformação humana” (NBR ISO 14044: 2009) .

A fronteira tecnosfera/ ecosfera pode então ser mais apropriadamente determinada pela definição de fluxo elementar como “substância simples ou energia entrando no sistema que está sendo estudado que foi absorvido da ecosfera sem a prévia transformação humana, ou substância simples ou energia deixando o sistema a ser estudado que é liberada na ecosfera sem a subsequente transformação humana” (BUENO, 2014).

3.1.2 Inventário de Ciclo de Vida (ICV) - modelagem da estrutura

Embasando-se nas decisões da fase de Objetivo e do Escopo, é recomendada a preparação de um quadro do fluxo técnico do sistema. Este quadro de fluxo deve mostrar os passos do processo principal. Mais tarde o mesmo pode ser redefinido quando do tratamento dos dados coletados.

O fluxo de referência é o fluxo para os quais todas as outras entradas e saídas convergem e se relacionam quantitativamente. Isto é relacionado com a unidade funcional. O fluxo de referência pode se expresso em relação direta com a unidade funcional.

A fronteira do sistema deve ser representada em um diagrama semi-esquemático que explicitamente demonstre quais partes dos estágios do ciclo de vida do sistema inicialmente interagem para serem incluídos e excluídos. As definições qualitativas das fronteiras de sistemas devem identificar quais partes do ciclo de vida deverão ser incluídas para fornecer, por exemplo, os dados requeridos ou garantir uma comparação válida em caso de estudos comparativos (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Em geral, todos os processos e fluxos que são atribuídos ao sistema analisado devem ser incluídos nas fronteiras do sistema. Entretanto, nem todos os processos ou fluxos elementares são quantitativamente relevantes: para os menos relevantes, dados de baixa qualidade (“dados estimados”) podem ser utilizados, limitando os esforços para coleta e obtenção de dados de alta qualidade para as partes. Entre estes, os irrelevantes podem ser totalmente desprezados. Importante que também os cortes devem ser determinados sistematicamente, para prevenção de supressões inapropriadas de partes relevantes (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Deve ser percebido que a qualidade dos componentes interage em um caminho multiplicativo e que, tipicamente, a qualidade mais pobre dos componentes afeta a qualidade dos dados seguintes.

3.1.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV).

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida AICV tem a função de agregar os dados do inventário e apoiar a interpretação. De acordo com as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), a normalização e a ponderação são estágios opcionais, que visam apoiar a interpretação do perfil de impacto, de forma buscar um resultado agregado. A normalização se refere ao cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação às informações de referência e a ponderação à conversão e possível agregação dos resultados dos indicadores entre as diferentes categorias de impacto utilizando fatores numéricos, baseados na escolha de valores. As metodologias de ponderação exigem a normalização prévia, já que a ponderação sem prévia normalização pode fornecer resultados falsos (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Ao mesmo tempo as análises de impacto (e opcionalmente normalização e ponderação) são também requeridos para aplicação de regras de corte para avaliação de completeza de dados.

A Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) é a fase em uma ACV, onde as entradas e saídas de fluxos elementares que foram coletadas e relatadas no inventário são traduzidas em resultados de impacto de indicadores relacionados com a saúde humana, meio ambiente natural, e o esgotamento dos recursos.

É importante notar que a ACV e a avaliação de impacto analisam os impactos ambientais potenciais que são causados, resultado de intervenções que cruzam a fronteira entre a tecnosfera e ecosfera, que agem sobre o ambiente natural e os seres humanos, muitas vezes, só após as etapas de destino e exposição.

Os resultados do AICV devem ser considerados como indicadores de impactos ambientais relevantes, ao invés de potenciais, nas previsões de reais efeitos ambientais. A ACV e AICV são igualmente distintos do risco baseado em instrumentação de substâncias específicas.

Utilizando os métodos AICV como identificadas no âmbito do estudo ICV / ACV, agora os resultados AICV devem ser calculados. Enquanto a ISO não aborda o desenvolvimento de métodos AICV em qualquer detalhe, formaliza a ligação entre os fluxos elementares de inventário e os fatores de avaliação de impacto, como explicitados a seguir (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010):

- 1) A avaliação do impacto no meio e / ou o nível de ponto final é executada pelo primeiro atribuindo os fluxos elementares de uma ou mais categorias relevantes de impacto. Este passo é chamado de "Classificação".
- 2) Em seguida, os resultados do inventário para os fluxos elementares individuais geralmente são multiplicados com os fatores de impacto relevantes dos métodos aplicados AICV. Este passo é chamado de "Caracterização".
- 3) Na prática da ACV, estes passos não são regularmente feitos por profissionais da ACV, mas isso é parte do trabalho para o desenvolvimento de métodos AICV. O

responsável deve garantir que os fluxos elementares de inventário estejam corretamente ligados com os fatores de AICV e - juntamente com os peritos AICV - determina ou desenvolve fatores de impacto faltantes se potencialmente relevantes para o estudo.

- 4) Os resultados resultantes dos indicadores caracterizados podem ser resumidos dentro de cada categoria de impacto. O conjunto resultante dos resultados do indicador agregado é o perfil de impacto caracterizado por produto, ou seja, os seus resultados AICV. Como os resultados AICV por categoria de impacto têm unidades diferentes, eles não podem ser diretamente comparados.

Existem métodos de AICV para “pontos intermediários” (midpoint) e “pontos finais” (endpoint), ou ambos em metodologias integradas de AICV. De forma geral, em metodologias *midpoint* um número maior de categorias de impacto é determinado, e os resultados são mais exatos e precisos quando comparados com as avaliações de endpoint, as quais consideram normalmente as três áreas de proteção (saúde humana, qualidade do ecossistema e uso de recursos). As principais categorias consideradas numa avaliação de midpoint são: mudanças climáticas, destruição da camada de ozônio, toxicidade humana, inorgânicos respiratórios, radiação ionizante, formação fotoquímica de ozônio, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, uso do solo e esgotamento de recursos, (BUENO, 2014).

3.1.4. Interpretação do Ciclo de Vida.

A fase de interpretação de uma ACV tem dois objetivos principais que diferem fundamentalmente:

- Durante os passos iterativos da ACV e para todos os tipos de entregas, a fase de interpretação serve para orientar o trabalho e para melhorar o modelo de Inventário do Ciclo de Vida, além de satisfazer as necessidades derivadas do objetivo do estudo.
- Se a passos iterativos da ACV resultou no modelo de ICV final e os resultados, e especialmente para os estudos comparativos de ACV (embora em parte também aplicável a outros tipos de estudos), a fase de interpretação serve para tirar conclusões consideráveis e - frequentemente - recomendações.

Na interpretação de ciclo de vida, os resultados da avaliação do ciclo de vida são avaliados a fim de responderem às questões colocadas na definição do objetivo

A avaliação é realizada para o estabelecimento da base para posteriormente serem tiradas as conclusões e serem efetuadas as recomendações durante a interpretação dos resultados do estudo de ICV /ACV. A avaliação é realizada em estreita interação com a identificação de problemas significativos, a fim de determinar a confiabilidade e robustez dos resultados.

4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é unanimemente considerada como uma metodologia confiável para a avaliação do desempenho ambiental das edificações. Devido à complexidade dos edifícios como sistemas compostos de vários componentes que interagem, os métodos de simplificação e adaptação da ACV para o setor de construção poderiam sofrer melhoramentos como, por exemplo, o uso de valores padronizados, a descrição simplificada do edifício, a unidade funcional, os limites do sistema e as regras de corte (CHEVALIER; PEUPORTIER, 2012).

O procedimento está sendo usado pelo setor da construção desde 1990 e é uma ferramenta importante para a avaliação de edificações (ORTIZ et al, 2009).

Na avaliação do ciclo de vida de um produto da construção civil, por exemplo, cada fase terá uma quantidade de fluxos de recursos que são consumidos e resíduos que são dispostos de alguma forma no meio ambiente, reciclado ou utilizado em outra linha de produção. Na ACV é feita a quantificação destes fluxos gerando grande quantidade de dados (OLIVEIRA, 2007).

Ainda há dúvidas sobre a elaboração de inventários de ciclo de vida e, particularmente, a lista mínima de substâncias necessárias para uma avaliação de impacto adequada, no que diz respeito às emissões em ambientes internos, a qualidade dos dados disponíveis e o uso de dados europeus, nacionais ou locais. Aspectos metodológicos específicos não estão em harmonia com a modelagem do CO₂ biogênico (por exemplo, o balanço de carbono de elementos de madeira), coprodutos, o fim de vida dos processos e a reciclagem. Seria útil para a elaboração dos cenários de análise a abordagem de questões imprecisas como a fase do fim de vida e comportamentos dos ocupantes das edificações.

A definição de indicadores ambientais, em especial a respeito dos recursos consumidos e até mesmo o consumo de energia mereceria mais esforços (OLIVEIRA, 2007).

No que diz respeito à avaliação dos componentes construtivos, a análise dos sistemas existentes para certificação ambiental de edifícios revela que há poucas ferramentas que avaliam o desempenho ambiental objetivamente através de Avaliação do Ciclo de Vida, predominando o reconhecimento de atributos de produtos (custo, durabilidade, renovabilidade, teor reciclado, etc.). O problema da abordagem por atributos é que esses são tratados isoladamente e perde-se a noção global do impacto (SILVA, 2007).

A fim de avaliar o impacto global das medidas de redução de consumo de recursos durante o período de vida de um edifício, a realização de um inventário do ciclo de vida do edifício como um todo demonstra-se uma ferramenta de grande utilidade (VERBEECK; HENS, 2010). O seu princípio consiste em analisar as repercussões ambientais de um produto ou atividade, a partir de um inventário de entradas e saídas (matérias-primas, energia, produto, subprodutos e resíduos) do sistema considerado (SOARES et al, 2006).

A adoção da ACV em edifícios e outras construções é uma tarefa complexa e tediosa, como uma construção incorpora centenas e milhares de produtos individuais e em um projeto de construção pode haver dezenas de empresas envolvidas. Além disso, o ciclo de vida esperado de um edifício é excepcionalmente longo, contém muitos componentes diferentes, são também localmente produzidos, normalmente únicos, causam impactos locais, são integrados com a infraestrutura, as fronteiras do sistema não são claras, etc. (BRIBIÁN et al, 2009). As ferramentas de ACV que estão atualmente disponíveis não são amplamente utilizadas pela maioria dos interessados, incluindo os projetistas, construtores, compradores ou ocupantes dos edifícios. Devido à sua complexidade, em geral as ferramentas de ACV são

utilizadas e desenvolvidas apenas por especialistas, na maioria das vezes só ao nível académico (MATEU; BRAGANÇA, 2011).

Assim sendo, ACV então não pode ser realizada no setor da construção com o mesmo nível de detalhe como na indústria (CHEVALIER; PEUPORTIER, 2012).

O desenvolvimento de estudos de ACV em edificações requer algumas alterações devidas, entre outros aspectos, às diferenças apresentadas com relação ao ciclo de vida de produtos industriais que envolvem, normalmente, um curto espaço de tempo. Obras de engenharia, ao contrário de produtos com vida útil de semanas ou meses são, em geral, caracterizadas por uma vida útil que se estende por alguns anos, décadas ou mesmo séculos (SOARES et al, 2006).

Algumas vezes a ACV acaba tendo limitações devido à falta de dados ou a inacessibilidade dos dados sobre os impactos que efetivamente acontecem em cada uma das fases do ciclo de vida de um material. Isto dificulta a aplicação do ACV (OLIVEIRA, 2007)

Para minimizar a dificuldade de aplicação das metodologias convencionais de ACV ao setor da construção civil, autores como (CHEVALIER; LE TENO, 1996), propuseram alguns requisitos especiais para a ACV de componentes construtivos, a saber:

- Regras especiais de fronteira do sistema devem ser definidas para forçar a separabilidade.

- Processos específicos para componentes construtivos devem ser modelados.

- A hipótese de estabilidade no tempo deve ser forçada ou cancelada.

- A hipótese de precisão tem que ser cancelada.

- A qualidade dos dados e as relações entre os eles devem ser documentadas.

- A lista de categorias de impacto deve ser aberta aos critérios definidos pelo utilizador, de acordo com um processo de negociação bem documentado.

- Assistência deve ser prestada aos utilizadores para a gestão dos resultados.
- Um programa de computador deve ser desenvolvido para auxiliar todo o processo.

Em avaliações embasadas em revisões de vários trabalhos mundiais publicados sobre a ACV na construção Civil, (ORTIZ et al,2009) em estudos de 22 publicações, (KHASREEN et al, 2009) estudos sobre 25 publicações (CABEZA et al, 2014) sobre 62 publicações, (BUYLE et al, 2013) sobre 38 publicações, algumas conclusões em comum convém ser destacadas:

- 1) Os estudos de ACV revistos são em sua maioria relativos às análises de edifícios e construções completas, inteiras;
- 2) Os estudos revistos foram realizados em sua maior parte nos países desenvolvidos e alguns poucos trabalhos foram encontrados em países em desenvolvimento. Especificamente na América do Sul apenas um foi encontrado, na Argentina, registrado por CABEZA et al, (2014).
- 3) Um grande número dos trabalhos lida com uma parte específica do ciclo de vida da edificação, mas poucos tratam de toda a vida útil. A vida útil considerada pela maioria dos autores foi entre 10 e 100 anos, com mais de 50% dos artigos considerando 50 anos, 19% considerando 40 anos e 9% considerando entre 80 e 100 anos (CABEZA et al, 2014).
- 4) Uma das conclusões de quase todas as pesquisas é a predominância da fase de utilização, especialmente devido ao consumo de energia de aquecimento e arrefecimento. Mesmo em climas muito diferentes esta conclusão parece ser válida com a comparação dos resultados entre países nórdicos e mediterrâneos (BUYLE et al, 2013). Contrário a essa conclusão, que parece se aplicar mais aos países europeus, também se afirma que a contribuição da fase de utilização em edifícios de zonas tropicais não é tão significativa, devido ao menor consumo de

energia de climatização (ORTIZ et al, 2009). Esta última conclusão vai ao encontro à afirmação de (AGOPYAN; JOHN, 2011), ao menos quanto à emissão de gases do efeito estufa, baseada nos dados do Inventário Brasileiro das Emissões e Remoção de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2009) que revela que no Brasil, diferentemente da média mundial, as emissões de gases do efeito estufa dos edifícios, durante a fase de produção e transporte de materiais é mais importante que os associados ao consumo de energia durante a fase de uso do edifício. Mesmo a madeira nativa empregada nas construções brasileiras, por ser transportada por longas distâncias, tem uma pegada ecológica de CO₂ mais elevada. Nos trabalhos realizados nos países desenvolvidos, quanto ao transporte ao contrário, reduzem a sua importância (KHASREEN et al, 2009), o que leva à conclusão de que os materiais de construção são produzidos localmente e as distâncias e os impactos associados são limitados. Nestes países, quando apenas alguns componentes são transportados ao longo de grandes distâncias, o impacto associado a estes não desempenha um papel importante (somente quando todos os materiais são transportados a uma grande distância, o transporte torna-se uma questão de preocupação).

Também a base regional de geração de eletricidade, por exemplo, tem uma grande influência sobre o impacto da fase de utilização (BUYLE et al, 2013).

- 5) Os estudos são difíceis de serem comparados devido à suas propriedades específicas, como o tipo de edifício (residencial, comercial, industrial, etc.), clima, requisitos de conforto, regulamentações locais, etc. Importante mencionar que não há nenhum acordo sobre a unidade funcional a ser considerada dificultando a comparação entre os trabalhos.

Um dos motivos do atraso na popularização do uso da ACV é que o modelo, requer uma enorme quantidade de informações e medidas, que encarecem e tornam trabalhosa e demorada a sua realização ainda a quase totalidade das análises de ciclo de vida publicadas, usam dados de inventários de emissões comerciais ou públicas existentes, prática que induz imprecisões significativas e podem, em muitos casos, levar a decisões equivocadas. A ACV atualmente é realizada como um projeto especial, efetuada em determinado momento, em que boa parte dos dados não foi medida pelo produtor e seus fornecedores, mas baseada, muitas vezes, em bases estrangeiras (o que pode ser um problema). A única possibilidade para a popularização da ACV seria com o desenvolvimento de modelos simplificados ancorados também em declarações ambientais (JOHN; AGOPYAN, 2011),.

No Brasil, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável por exemplo, apresenta uma versão de ACV, a Avaliação de Ciclo de Vida Modular (ACV-m) como uma versão de escopo reduzido que apresenta sincronia com a ACV tradicional e que garante o alcance do objetivo da avaliação sem perda das características da metodologia e pode, em muitas situações, ser utilizada como etapa inicial de estudo. A vantagem na simplificação é tornar a avaliação mais praticável, pois uma ACV completa requer muito tempo para a sua realização e pode ocasionar em alto custo de execução. A vantagem da ACV-m está então na menor complexidade do levantamento, centrado nos aspectos ambientais mais relevantes, cujos dados devem ser sistematizados pelas empresas ou de fácil obtenção (CBCS, 2013).

A iniciativa Avaliação de Ciclo de Vida Modular (ACV-m) propõe a identificação de cinco aspectos mínimos, possíveis de serem identificados em qualquer processo: consumo de energia, consumo de água, consumo de matérias-primas, geração de resíduos e emissão de CO₂. Além da seleção de materiais com sustentabilidade, seria possível ao setor da construção civil inventariar e certificar projetos e empreendimentos (ibid.).

Alguns aspectos devem ser considerados no ordenamento de desenvolvimento de uma metodologia simplificada de ACV. Por exemplo, a entrada de dados deve ser fácil de ser obtida no projeto da construção, os indicadores e as categorias de impacto selecionadas devem ser simples, para arquitetos, engenheiros, e o usuário final poderem ter o entendimento dos resultados. Por exemplo, se eutrofização é escolhida como uma categoria de impacto, poucas pessoas irão entender o resultado. Mas consumo de água, energia incorporada, geração de resíduos, etc. são bem conhecidos. Os indicadores selecionados também devem complementar os resultados de certificação de energia, a fim de estabelecerem uma forte ligação entre a ACV e as metodologias de certificação de edifícios, (BRIBIÁN et al, 2009).

Em estudo quanto à relevância da simplificação de ACVs de componentes das construções, os resultados das ACV completa e da ACV reduzida de edificações obtiveram-se resultados que diferiram entre 15 a 30% entre as duas. Para todos os componentes estudados alguns materiais possuem maior ou menor importância que outros. Para alguns componentes o transporte teve um alto impacto. Não é conclusivo se uma abordagem simplificada em comparação com uma global resultará em valores significativamente diferentes (KELLENBER; ALTHAUS, 2009).

4.1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de estruturas de concreto armado

Nas estruturas construídas com concreto, a produção de seus materiais constituintes, especialmente a produção de cimento, o alto impacto ambiental é devido ao consumo intensivo de energia e a grande emissão de CO₂ (MULLER; HAIST; VOGEL, 2014).

A ACV do concreto e suas matérias primas continuam sendo uma pesquisa limitada apesar da expansão do número de estudos nos anos recentes. Os impactos ambientais do ciclo de vida de outros materiais além do cimento Portland, como adições e o consumo de água, são raramente incluídos nas publicações sobre ACV da produção do concreto. Além disso, investigações das emissões tóxicas ao ar são necessárias, além de abrangente cadeia de fornecedores de gases de efeito estufa e critérios de emissões de poluentes atmosféricos. Similarmente ao Impacto de Ciclo de Vida (ICV) da produção de cimento, quanto ao ICV da produção de concreto, também faltam dados que reflitam variações tecnológicas e geográficas. Ainda as propriedades do concreto em termos de tensão, durabilidade, tipo de aplicação, etc., deveriam ser definidas de modo transparente em uma unidade funcional equivalente, que parece ser um dos fatores de maior influência na interpretação de resultados de ACV, quando baseada em comparações de traços de concreto analisados em diferentes estudos (GURSEL et al, 2014), (HEEDE; BELIE, 2012).

No campo da literatura específica três importantes limitações são observadas nos recentes estudos de ACV de concreto (GURSEL et al, 2014):

- 1- Falta de uma avaliação holística dos impactos ambientais: a literatura sobre a ACV do concreto tem seu foco no uso de energia e das emissões de gases do efeito estufa, mas existem outras questões importantes quanto às emissões tóxicas de seus componentes constituintes.
- 2- Falta de uma avaliação da aplicação de variações regionais e tecnológicas nas atuais ACV: escolhas dos materiais de construção dos edifícios são efetuadas localmente, e a “pegada ambiental” do concreto deve ser determinada localmente, no contexto de uma aplicação específica. Tal importância também é indicada por outros estudos, os quais ressaltam que a ACV envolve a

comparação de impactos, a escolha do concreto de referência, caracterizado por consumo de cimento e a tensão de compressão de acordo com as aplicações de normas que são extremamente importantes. Isto se deve ao benefício ambiental devido à redução do cimento no concreto e às tensões que governam as dimensões das estruturas, em comparação com a de estrutura de referência (HEED; BELIE, 2012).

- 3- Negligenciar partes da ACV que são devidas às insignificâncias, baseadas em vinculações ou estudos passados. Quando considerados os volumes de produção global, mesmo 2% de uso de energia no sistema de produção do concreto pode elevar uma parcela significativa de efeitos ambientais calculados. O mesmo argumento é válido para outros efeitos ambientais como consumo de água e emissões tóxicas, dentro de um contexto global de produção.

A metodologia e os modelos de aplicação da ACV para estruturas de concreto se fazem necessárias e devem considerar toda a vida (do “berço ao túmulo”) do produto concreto (elemento, estrutura, etc.). O típico ciclo de vida do concreto deve contemplar os seguintes estágios: aquisição de matérias-primas, produção do concreto e componentes estruturais, projeto e construção, operação e manutenção, reparo, renovação, demolição, reciclabilidade e disposição de resíduos, (HÁJEK; FIALA; KYNCLOVÁ, 2011).

A nova abordagem conceitual da complexa avaliação das estruturas é uma avaliação do ciclo de vida integrada (ACVI), que é uma avaliação multi-paramétrica da estrutura sobre todo o ciclo de vida. Esta abordagem integra os principais aspectos da sustentabilidade como os aspectos ambientais, aspectos econômicos e aspectos sociais durante toda a vida da estrutura. Ela cobre toda a técnica essencial, questões ambientais, sociais e econômicas,

incluindo encargos ambientais (a ACV clássica), funcionalidade, segurança, serviçabilidade, durabilidade, manutenção, reparação, custos iniciais e operacionais, além de outros fatores. Os critérios selecionados devem representar as questões chave no projeto e construção de estruturas de concreto de alta qualidade. A aproximação integrada é necessária para garantir que a estrutura de concreto atenderá por meio de sua esperada vida de serviço com o máximo de qualidade funcional e níveis de segurança enquanto os encargos ambientais e econômicos são mantidos em baixos níveis aplicáveis (HÁJEK; FIALA; KYNCLOVÁ, 2011).

Uma metodologia de avaliação do ciclo de vida integrada para estruturas de concreto foi preparada pela Fédération Internationale du Béton, dentro do fib C3 Comissions Task Group TG 3.7, “Integrated life cycle assessment of concrete structures” – State of the art report - Bulletin 71 (FIB, 2013), com o intuito de atender a estas questões e padronizar os trabalhos a serem realizados.

Segundo a publicação, um projeto de ciclo de vida integrado (PCVI) e a avaliação do ciclo de vida integrada (ACVI) são baseados na combinação da abordagem dentro de um complexo processo de projeto e avaliação. A abordagem integrada é necessária para garantir que a estrutura irá atender durante a toda a expectativa de vida de serviço com um máximo de funcionalidade e segurança, enquanto as cargas econômicas e ambientais sejam mantidas em níveis baixos. A abordagem representa uma completa avaliação holística para o projeto, análise e otimização das estruturas.

O princípio básico da avaliação de ciclo de vida integrada pode ser expresso por um complexo modelo tridimensional, como mostrado na figura 4. No eixo horizontal (x) os grupos de critérios de desempenho são selecionados, no eixo horizontal (y) as fases do ciclo de vida são listadas e no eixo vertical (z) as diferentes unidades funcionais (definições de níveis da estrutura) são dadas.

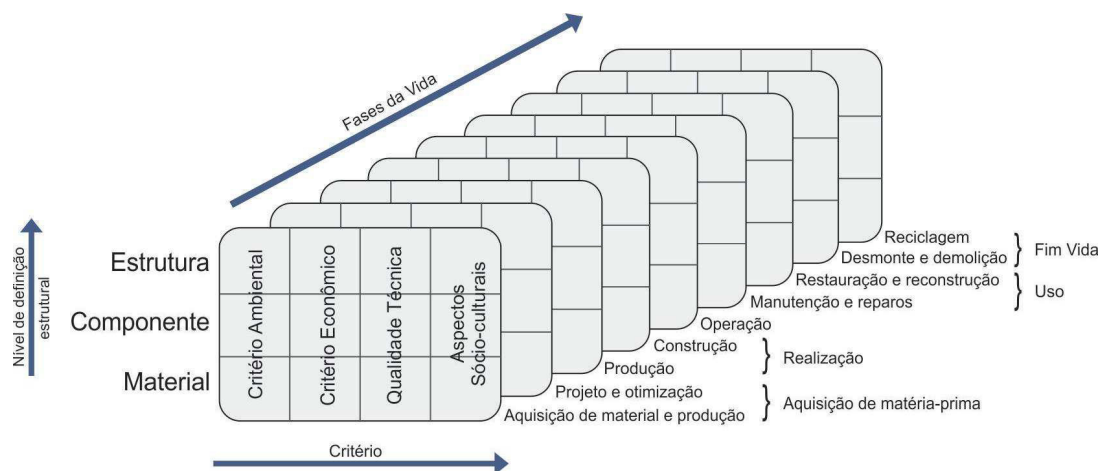


Figura 4: Modelo Tridimensional do Princípio básico da ACV integrada (fib Bulletin 71, 2013, tradução nossa)

As considerações complexas de todos os elementos deste modelo como uma ferramenta são muito complicadas e podem não ser apropriadas para o uso prático. Baseado neste modelo complexo, ferramentas para diferentes projetos, otimização e avaliação podem ser definidas e desenvolvidas. Estas ferramentas devem cobrir uma parte específica do modelo 3D com uma definição clara de fronteiras com outras seções não inclusas (FIB, 2013),

A metodologia geral da ACVI necessita de adaptações para ser aplicável às estruturas de concreto, devido às propriedades inerentes do concreto como um material, tanto quanto os tipos diferentes de estruturas nas quais o concreto é utilizado. O concreto é utilizado em uma vasta variedade de estruturas (edifícios, pontes, estradas, barragens, etc.), cada uma projetada para um tipo específico de funcionalidade e vida útil em mente. Por todas essas razões nenhum delineamento inicial simples para uma ACVI de estruturas de concreto pode ser especificado. O organograma da figura 5 mostra o processo de uma ACVI aplicado em diferentes tipos de estrutura de concreto. Neste processo especificidades regionais têm importância chave, devido ao concreto ser tipicamente produzido por materiais, técnicas e sistemas de transporte regionalmente disponíveis (ibid).



Figura 5: organograma do processo de uma ACVI aplicado em diferentes tipos de estrutura de concreto
(fib Bulletin 71, 2013, tradução nossa)

Os métodos e modelos de avaliação devem considerar o ciclo de vida de um elemento de concreto, e/ ou da estrutura de concreto completa, sendo preferível e benéfico todo o ciclo de vida, conforme esquema da figura 6. O ciclo de vida de uma estrutura de concreto pode ter uma duração diferente, dependendo do tipo de uso do concreto. Apesar disso, em geral, séries detalhadas das fases do ciclo de vida podem ser identificadas na maioria das estruturas de concreto, (FIB, 2013).



Figura 6: Ciclo de vida da estrutura de concreto (fib Bulletin 71, 2013, tradução nossa)

A figura 7 mostra as fases do ciclo de vida de uma estrutura de concreto (HÁJEK; FIALA; KYNCLOVÁ, 2011). Por meio de sua análise torna-se claro que os esforços para a execução de uma ACV completa de uma estrutura é um trabalho muito complexo. Por esta razão um critério de corte deve ser estabelecido ao longo do objetivo e do escopo de uma ACVI. Este critério de corte deve refletir o escopo da ACVI e estar de acordo com as fontes de dados disponíveis para o estudo de ACVI (FIB, 2013).

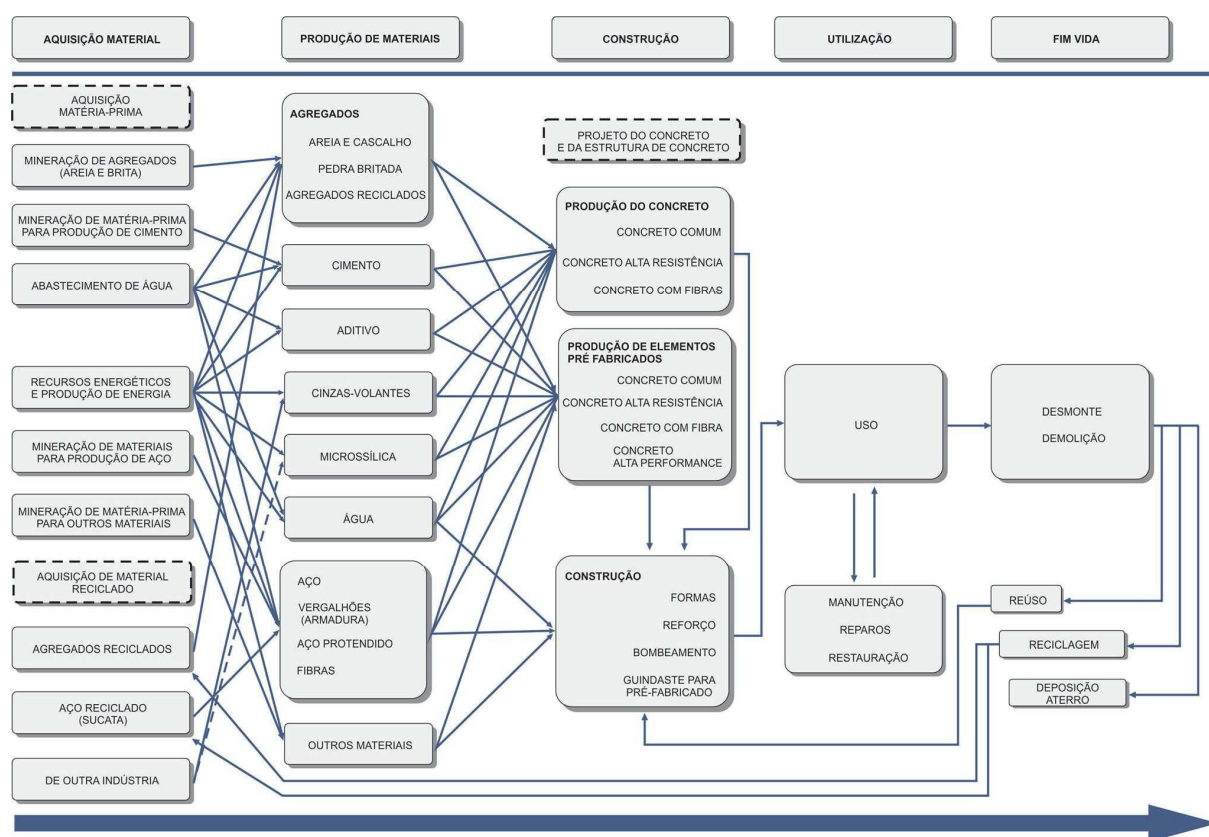


Figura 7: Fases do Ciclo de vida da estrutura de concreto (fib Bulletin 71, 2013, tradução nossa)

Apesar das adaptações na metodologia de ACVI das estruturas de concreto há certas questões que requerem especial atenção durante o desenvolvimento de uma ACVI. Estas questões são (FIB, 2013):

- a) Especificidades das fases do ciclo de vida das estruturas de concreto: qualidades de sustentabilidade (qualidades de impactos ambientais, econômicas e sociais), em particular as fases do ciclo de vida das estruturas de concreto associadas com diferentes processos tecnológicos. Estes processos tecnológicos contribuem para um incremento do impacto total dentro do ciclo de vida completo da estrutura de concreto.
- b) Identificação das questões de desempenho para diferentes tipos de estruturas de concreto: a seleção do critério de análise a ser implementado em um perfil específico da estrutura de concreto varia com o tipo de estrutura. Devido às exigências de desempenho, as questões essenciais são geralmente diferentes para a estrutura de suporte de cargas de um edifício, estrutura de ponte, estrutura de estrada, barragem, etc. Os projetos de estruturas de concreto são realizados de acordo com códigos e normas locais ou regionais. Estes códigos tem a intenção de servir aos tipos de construção usuais, representando uma demanda da sociedade por qualidade. Ainda, estes documentos representam um mínimo de qualidade aceitável para tais estruturas. Para a maioria dos códigos e normas nacionais e regionais uma vida útil de aproximadamente 50 anos é um mínimo assumido.
- c) Estratégias de desempenho para estruturas existentes.

Finalmente, quanto ao modelo de ACVI proposto pelo FIB (FIB, 2013), sobre os dados genéricos poderem ser utilizados, ao contrário de dados específicos que descrevam os impactos ambientais e aspectos do ciclo de vida de um estudo de ACV, dados genéricos podem ser usados para os cálculos onde dados específicos de um sistema de ACV/ ICV não estão

disponíveis. Frequentemente dados genéricos não refletem diretamente as condições locais sob estudo. Uma compensação de dados deve então ser feita.

O principal benefício de uma Avaliação do Ciclo de Vida Integrada é a introdução em paralelo de várias recomendações e normas em um processo e/ ou avaliação de projeto integrado, cobrindo uma vasta rede de questões de sustentabilidade.

A abordagem da ACVI de estruturas de concreto pode contribuir para um contínuo processo de desenvolvimento e melhoria da tecnologia do concreto para o uso em estruturas sustentáveis(FIB, 2013).

Especificamente, quanto à parcela da edificação relativa à estrutura de concreto armado e à fase de execução do projeto da mesma, objeto desta pesquisa, alguns fatores necessitam ser estudados e melhor entendidos quanto a sua importância no desempenho ambiental da estrutura, quanto às hipóteses e modelos de projeto especificados pela ABNT NBR 6118:2014 - *Projeto de estruturas de concreto* e suas referências normativas relativas aos Estados Limites da estrutura:

- O comportamento quanto ao Estado Limite Último (ELU): Entende-se o ELU pela perda de equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido; ELU de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, ELU provocado por solicitações dinâmicas; ELU por colapso progressivo; outros ELU que eventualmente possam ocorrer em casos especiais.
- Ao Estado Limite de Serviço (ELS): que são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional das mesmas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos utilizados.

Para a obtenção da conformidade quanto aos Estados Limites (ELU e ELS), diversos fatores são condicionantes ao cumprimento dos mesmos, como as solicitações (cargas permanentes, móveis e acidentais), resistências (como a classe de resistência do concreto, resistência da estrutura frente ao fogo, etc.), deformações e vibrações excessivas (condicionadas pelo módulo de elasticidade, dimensões das peças estruturais, etc.), requisitos mínimos de durabilidade (cobrimentos mínimos, consumo mínimo de cimento, relação água/cimento mínima, etc.), e ainda as especificações construtivas (como o tamanho mínimo de peças, taxas mínimas de armaduras, etc.).

4.1.1) Revisão de pesquisas sobre ACV de estruturas de concreto armado.

A estrutura de suporte de carga dos edifícios parece ser um dos subsistemas menos investigados e menos aprofundados em termos de compatibilidade ambiental, particularmente no que diz respeito ao amplo setor da construção. Apesar da relação próxima com os elementos que não efetuam função estrutural, a estrutura de suporte de cargas é a única parte que não pode ser substituída ou modificada durante a vida da edificação, ou somente uma pequena porcentagem. Ao contrário, uma renovação global, de edifícios com idade menor que 50 anos frequentemente envolve a completa remoção de todos os componentes não estruturais, mantendo-se apenas a estrutura de suporte, a qual resultará, após o processo estar completo, na estrutura do novo edifício (PALEARI et al, 2011).

Uma revisão de diversos estudos é a seguir efetuada. Os estudos analisados contemplam diversas comparações entre as estruturas de concreto e também destas estruturas com as de outros materiais (por exemplo, aço e madeira), usos diferenciados

(residencial, comercial, educacional), concretos com resistências à compressão diferentes, peças diversas (lajes, pisos, vigas, etc.) e produção do concreto para as estruturas.

(YANG, 2011) em uma de suas pesquisas comparou tipos de sistemas estruturais para edificações comerciais, educacionais e hospitalares, resultando em vinte soluções estruturais diferentes. Foi utilizado pelo autor o software Athena®Ecocalculator. O resultados foram utilizados para a avaliação do carbono incorporado, energia e geração de resíduos

As conclusões são que a estrutura, inclusive as fundações, representa 50% ou mais do total de CO₂ incorporado, o mesmo autor também não observou uma vantagem clara das estruturas de aço sobre as de concreto armado e vice-versa. A importância maior foi a quantidade de concreto em todos os edifícios, o que resultou em um valor significativo na alteração de CO₂ incorporado, por meio de um consumo menor de concreto e cimento no total. O CO₂ incorporado nos elementos não estruturais não afetou significativamente devido as mudanças estruturais. Assim como regra geral, o CO₂ incorporado na estrutura pode então ser otimizado sem afetar adversamente o impacto ambiental total.

(PALEARY et al, 2011), investiga no contexto italiano uma estrutura de edifício residencial de 4 andares com 3 materiais diferentes, concreto armado com alvenaria, steel frame e paredes leves de dry wall e estrutura de madeira laminada. O trabalho não especifica o método de avaliação e contempla a energia e carbono incorporados. Também é realizada uma análise com agregados reciclados. São avaliadas as fases de produção e construção, uso e consumo de aquecimento, resfriamento e ventilação. A vida útil das estruturas de concreto na Itália são normalmente consideradas de 100 anos.

Nas estruturas de concreto com alvenaria, destaca-se que a existência de Declarações de Produtos Ambientais (*Environmental Product Declaration* – EPDs) para tijolos e para o concreto não ajudaram a refinar as avaliações porque ocorrem muitas incertezas relacionadas

a vasta disponibilidade de diferentes concretos na Itália. Também para as estruturas de aço e madeira, ocorre uma difícil obtenção de dados primários, dificultando as análises.

Quanto à energia, conclui que a estrutura em steel frame tem um consumo de 136% maior em relação à de concreto armado e 306% em relação à de madeira. Quanto à liberação de CO₂ o steel frame apresentou valores duas vezes superiores à estrutura de concreto armado e 306% em relação à estrutura de madeira.

(HÁJEK et al, 2011) faz uma análise ambiental de 4 pisos estruturais alternativos com dados da República Tcheca. A análise foi primeiramente de estruturas de pisos e não contempla vigas e estruturas de suporte. O objetivo declarado do trabalho foi demonstrar as vantagens do concreto de alto desempenho (HPC). Foram avaliadas 4 alternativas de lajes projetadas com 3 diferentes classes de concreto: o concreto C30/C37, HPC 105 e HPC 140.

As categorias de impacto avaliadas foram consumo de materiais, consumo de água, consumo de energia, potencial de aquecimento global, acidificação, ozônio fotoquímico e a reciclabilidade dos materiais. Foi verificado o transporte de materiais básicos até a usina e o final de vida considerado com a deposição do material em aterro. Foi utilizado o software GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems), versão 4.6.

O impacto ambiental da fase de construção, em comparação as fases de utilização e fim de vida, teve uma influência dominante no impacto ambiental, representando de 80 a 95% do total. O impacto na fase de fim de vida está mais influenciado pelo transporte e energia associados com a demolição da estrutura.

A estrutura projetada com HPC 105 foi a de melhor desempenho ambiental devido à redução da seção obtida, já que mesmo, com aumento para o concreto com HPC 140 não teve as dimensões alteradas.

Em outra pesquisa realizada por (KAWAI, 2011), foi efetuada uma comparação entre estruturas de contenção de uma estrada, composta por blocos de concreto pré-fabricados preenchidos com solo (considerada alternativa no trabalho) e outra convencional de concreto armado, de 8 metros de altura por 120 metros de extensão.

Foi avaliada apenas a emissão de CO₂ para a unidade funcional de 1m³ tendo sido obtida uma redução de 34% com a estrutura chamada alternativa em relação à convencional.

Em um estudo referente a estrutura de concreto de pontes realizado por (HABERT et al, 2012) o problema estudado fundamentou-se partindo-se da lógica que, aumentando-se a resistência mecânica do concreto, obtêm-se um aumento no impacto ambiental por m³ do concreto produzido pelo aumento da quantidade de cimento consumido. Entretanto, a quantidade de concreto necessária pode ser diminuída para a construção dos elementos estruturais. Para se saber qual o aumento na resistência do concreto resultou em uma diferença significativa na escala da estrutura, o estudo avaliou as consequências ambientais no uso de concreto de alto desempenho (CAD) em comparação ao concreto convencional.

No estudo, baseado no contexto francês, foi escolhido o método CML (apesar de ter sido avaliada a utilização do EDIP) porque é o mesmo tipo de indicador utilizado nas normas ambientais francesas. Os indicadores utilizados foram redução abiótica, acidificação, eutrofização, aquecimento global e redução da camada de ozônio.

O tráfego durante o ciclo de vida da ponte considerada não foi incluído no sistema por ter impacto muito maior do que a construção e manutenção da estrutura. Se fosse considerado iria prevalecer sobre os resultados e tornaria difícil a distinção.

A comparação entre as duas soluções demonstrou tendências parecidas exceto que o material na fase de construção foi muito menos importante para a ponte com o CAD.

O impacto na fase de construção foi verificado que ocorreu principalmente por conta da energia utilizada pelos equipamentos no local de trabalho. O transporte dos trabalhadores representou 30% do impacto ambiental, com aproximadamente 100.000 Km de transporte.

No estudo do caso, o uso do CAD resultou em uma redução de 20% no impacto de aquecimento global e 50% do impacto se apenas a produção do concreto for considerada. Não foi avaliado o efeito da carbonatação na estrutura.

(DONG et al, 2015) avaliaram o efeito do uso da substituição de dados locais por dados estrangeiros na produção de concreto em Hong Kong. Os inventários utilizados foram de duas ferramentas o Ecoinvent e o United States Portland Cement Association (US PCA) dada a sua similaridade em termos de cobertura das fases do ciclo de vida, unidade funcional (m^3) e emissões.

Os resultados indicaram que uma alteração em apenas um dos dados referentes à eletricidade resultou em um aumento de até 20% no impacto. As alterações na ACV do concreto são devidas principalmente as contribuições são devido ao cimento e ao transporte. O cimento foi responsável por mais de 60% da poluição ambiental na maioria das categorias de impacto.

Na Coréia, outro estudo (TAE et al, 2011) propôs um plano para a avaliação da energia consumida e as emissões de CO₂ no ciclo de vida de edifícios para a avaliação do desempenho ambiental com a utilização de concretos de alta resistência.

A análise estrutural foi efetuada pela substituição de 4 tensões de compressão do concreto (24 MPa, 27 MPa, 30 MPa e 35 MPa) pela de 40 MPa (classificada de “alta resistência” na pesquisa). Também foi proposta a utilização de 20% de escória de alto forno na composição do cimento para a redução das emissões de CO₂. O tempo de vida útil considerado foi de 100 anos.

Baseado nos resultados, a quantidade de concreto e aço foi computada e comparada com a de projetos existentes. Por meio da análise dos resultados, verificaram-se as reduções no consumo de energia e emissões de CO₂, estas atribuídas à redução no consumo de concreto e quantidade de aço em consequência da diminuição das seções transversais das peças verticais com a aplicação de concreto de alta resistência. Como resultado, as reduções no consumo de concreto e aço das peças verticais analisadas foi de 8,8% e 30,3% respectivamente e tais reduções resultaram em 5,7% e 19,7% da taxa de redução do concreto e aço do edifício completo.

A distribuição do consumo de energia e emissões de CO₂ foi avaliada com 30% ocorrendo na fase de construção, 70% nas fases de uso e manutenção, e aproximadamente 1% na fase de demolição e deposição. O consumo de energia do edifício com concreto de alta resistência, na fase de construção, resultou em uma redução de 3,79% a 51,89% comparado aos casos de concretos com resistências gerais e a emissão de CO₂ também sofreu redução de 4,02% a 52,06% (dependendo do caso comparado).

Ainda na Coréia, outro trabalho (PARK et al, 2012) propôs um método para a avaliação do ciclo de vida das emissões de CO₂, utilizando-se de um banco de dados fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente daquele país, baseado na tensão de compressão do concreto.

A emissão de CO₂ é baseada na tensão de compressão de diversos tipos de concreto que são atualmente utilizados nas construções coreanas: 18 MPa, 21 MPa, 24 MPa, 27 MPa, 30 MPa e 35 MPa. Também foram levadas em conta as adições no cimento e as diferentes estações do ano na produção.

As conclusões obtidas foram:

- As emissões de CO₂ no ciclo de vida aumentaram linearmente com o aumento da tensão de compressão do concreto,

- Em idênticas tensões de compressão, a produção do concreto no inverno apresentou resultados 5% maiores nas emissões de CO₂, quando comparados as demais estações. O motivo é que no inverno ocorre um aumento no teor de cimento na mistura do concreto dada a dificuldade na cura durante a estação fria.

- Foi obtida uma equação, baseada em regressão matemática, que permite determinar as emissões de CO₂ (Y_{CO_2}) para o concreto com as diferentes tensões de compressão, com o seguinte valor: $Y_{CO_2} \text{ (kg-CO}_2\text{/m}^3\text{)} = 26,697 \times \text{tensão de compressão (MPa)} + 253,1$.

- A quantidade de CO₂ emitido pelo concreto com adições pozolânicas foi reduzida em 47% quando comparado ao concreto sem adições. Foram utilizadas a adição de cinzas volantes ou escória de alto-forno ao cimento com valores de 10% a 30%.

Na Itália, outra investigação (FORABOSCHI et al, 2014) partiu do paradigma de que edifícios altos não são sustentáveis, principalmente devido à grande quantidade de materiais necessários para a execução da estrutura. Um edifício de grande altura necessita de um sistema de resistência às solicitações de vento, enquanto os edifícios de pequena altura podem resistir a cargas de vento com praticamente apenas seu sistema estrutural de resistência por gravidade.

O estudo analisou a energia incorporada em estruturas de edifícios altos compostos por núcleo central de concreto reforçado e outros concretos ou estruturas de aço. O trabalho contempla a estrutura mais baixa de 20 pavimentos até a mais alta de 70 pavimentos, desde que a sua estrutura seja adequada pela ótica da perspectiva ambiental.

Os resultados demonstram que o tipo de material do pavimento é o componente simples crítico para as estruturas de edifícios altos. Nas simulações, foram considerados pavimentos com sistema steel deck, lajes maciças de concreto armado, lajes de concreto com

sistema leve tipo *bubbledeck*, lajes pré-fabricadas com elementos de enchimento leve em EPS, lajes com alvéolos vazios e lajes com elementos leves de enchimento de polipropileno.

Como resultados observou-se que a redução da carga permanente dos pavimentos não implica necessariamente na redução da energia incorporada de todo o edifício.

Uma conclusão obtida foi a de que o pavimento dos edifícios composto por lajes com materiais de enchimento leve, resulta em valores de energia incorporada maior do que os edifícios compostos de lajes maciças de concreto armado. A utilização dos produtos leves resultou em maior energia incorporada do que o concreto que eles economizaram.

A conclusão é que o caminho direto para a redução de energia incorporada nas estruturas horizontais seria o aumento do número de pilares, para a redução dos vãos de vigas e lajes. Isto sendo efetuado, as lajes dos pavimentos terão menor espessura e então serão reduzidos os valores de energia incorporada, com todos os demais parâmetros sendo mantidos. Contudo, um grande número de pilares irá reduzir os espaços vazios dos pavimentos, o que prejudicará a qualidade arquitetônica dos edifícios.

Em estudo de um pórtico constituído por 4 pilares e de uma viga e 4 vãos de um edifício localizado na cidade de Guimarães em Portugal (PEYROTEO et al, 2005), por meio da ACV da estrutura de concreto armado e estrutura metálica se avaliaram os impactos ambientais paralelamente. Abordou-se o parâmetro μ (porcentagem de aço) nas estruturas de concreto armado, tentando se estabelecer o valor que conduzisse às estruturas mais favoráveis em termos ambientais.

A conclusão deste estudo foi que em termos ambientais e para as seções estudadas, quanto maior foi a porcentagem de aço utilizada, menores foram os impactos causados. Este resultado, segundo os autores, ocorreu devido à obtenção de menor seção de concreto do pórtico devido ao aumento na porcentagem de aço na peça estrutural. Verificou-se que após

definidos vários valores de μ com suas correspondentes seções obtidas, à medida que a porcentagem de aço aumenta, além da redução dos impactos ambientais, ocorre também a redução dos custos (PEYROTEO et al, 2005).

O mesmo trabalho também verificou que o pórtico analisado em estrutura metálica resultou em impactos ambientais maiores e não foi levada em conta a deposição ou reciclagem no fim de vida dos materiais.

A aplicabilidade do software GBTool 2005 foi efetuada em outro trabalho (LIBRELOTTO; JALALI, 2008), já que, segundo os autores, permitiu-se a consideração do CO₂ incorporado nos materiais, o que é uma grande preocupação em países de clima frio (com grande demanda por aquecimento durante períodos relativamente longos) e/ou tenham matrizes energéticas fortemente centradas no uso de combustíveis fósseis. Consideram que no Brasil o controle de CO₂ durante as operações do edifício não tem a mesma validade, uma vez que a emissão de CO₂ pelos países em desenvolvimento é insignificante diante das emissões dos países desenvolvidos. Quanto às limitações e dificuldades de aplicação do sistema, verificou-se que a ferramenta necessita de conhecimento prévio de uma grande quantidade de dados necessários para a avaliação, sendo que quanto maior for o nível de detalhamento do edifício, maior a dificuldade para obterem-se dados e para a análise.

Em outro trabalho realizado por (FREITAS Jr et al, 2010) efetuou-se um levantamento à partir de médias aproximadas das quantidades de CO₂ gerados pela produção dos diversos materiais de construção e foi aplicado a um edifício residencial de Curitiba, com 14 pavimentos e área de 1344 m². Foi considerado o CO₂ gerado pela queima de combustíveis na produção e a liberação devido à decomposição química da matéria-prima. Não foram avaliadas outras origens do CO₂ como o resultante do transporte ou geração de energia elétrica.

Analisando-se os resultados, verifica-se a importância relativa de cada material onde o concreto correspondeu a 16,1% e o aço a 11,1% do total de emissões dos materiais analisados (concreto, aço dos vergalhões, cal, tijolos, telhas, cerâmicas, alumínio e vidro). Por meio do software SIMAPRO, (GARCIA et al, 2010), adotaram como unidade funcional o elemento estrutural pilar, este em concreto armado ou perfil de aço laminado. A metodologia foi a Impact 2002+ com a adoção do banco de dados suíço Ecoinvent. As etapas do ciclo de vida avaliadas foram a extração de matéria-prima até a sua aplicação na estrutura.

Como conclusões, o pilar em aço resultou em uma contribuição maior no impacto ambiental do que o de concreto armado e também se conclui que a utilização de bancos de dados estrangeiros, no que se refere às etapas avaliadas pode trazer incoerências, já que os impactos referentes à matriz energética e a utilização de água mudam com a realidade de cada país.

Em mais uma trabalho realizado por (SAADE et al, 2013) efetuaram-se estudos de avaliação do ciclo de vida de concretos com CPI S-32, CII E-32 e CIII 32 e com as classes de resistência à compressão, variando de 25 a 60 MPa. A unidade funcional adotada foi de um pilar ou viga hipotético de concreto armado com seção 30 x 30cm e comprimento de 300 cm com classe de agressividade III.

Para a previsão da vida útil foi utilizada o programa LIFE 365 V.2.1. A plataforma de apoio para a avaliação do ciclo de vida foi o software de ACV SIMAPRO 7.3. Os dados para a modelagem dos ciclos produtivos foram retirados de artigos e publicações brasileiros.

Para a realização da avaliação do ciclo de vida foi definida uma unidade de resistência característica (1 MPa) e um ano de vida útil como unidades funcionais. A avaliação foi feita do “berço ao portão”.

Como resultados, constatou-se que o uso da escória granulada de alto-forno em substituição parcial ao clínquer contribuiu significativamente para a minimização de vários aspectos ambientais associados ao concreto.

Ao se utilizar a unidade de resistência como unidade normalizadora verificou-se que resistências mais altas implicaram em melhoria ambiental global do concreto. Por outro lado, quando se considerou a vida útil como unidade normalizadora foi observada que as resistências características maiores implicaram em melhoria parcial. O aumento da vida útil não superou o aumento das cargas ambientais associadas ao maior teor de clínquer.

Em outra abordagem, autores como (ISAIA et al, 2013) utilizaram como unidade funcional um pilar hipotético com variação das classes de resistência do concreto de 20 MPa a 50 MPa, com dimensões de base de 20cm e em todas as seções bitolas de 12,5mm de aço estrutural. No trabalho foram considerados apenas os impactos ambientais da areia natural, da pedra britada, e do cimento CP IV-32. Não foram considerados os impactos do consumo de aço, madeira, aditivos e do coprocessamento do cimento. Os inventários das emissões foram convertidos em gás carbônico equivalente (CO_2e).

O aumento nas classes de resistência propiciou a redução na seção da peça, diminuindo o impacto ambiental, os custos e a utilização de matéria prima. Os mesmos autores concluíram que apesar da vantagem do aumento da classe de resistência do concreto possibilitando a redução da seção para suportar a mesma carga, ao se adotar uma geometria mais compacta não seria possível absorver a flexão, levando a peça estrutural à ruptura.

Na Espanha (PAYA et al, 2008), após terem proposto uma equação ambiental baseada no método de avaliação ambiental Ecoindicator 99, efeturam o estudo (PAY et al, 2009) que propõe uma equação ambiental do CO_2 incorporado para a análise de estruturas de edifícios e uma segunda equação para consideração do custo da estrutura.

A metodologia foi aplicada para 6 edifícios típicos de até 8 andares. O banco de dados utilizado, relativo às emissões de CO₂ incorporado foi obtido do Instituto da Tecnologia da Construção da Catalunha. A avaliação de soluções estruturais seguiu o código espanhol para concreto estrutural.

Os dois objetivos da pesquisa, valor do CO₂ incorporado e custos, parecem estar altamente relacionados já que, as soluções referentes às emissões de CO₂, resultaram na maioria dos casos em custos apenas 2,77% maiores do que as soluções de custos mais econômicos. Por outro lado, as melhores soluções econômicas são desfavoráveis em aproximadamente 3,8%. Tudo isso conduz a uma conclusão de que o CO₂ incorporado e as metas de custos andam juntos no contexto das estruturas do estudo.

Uma interessante discussão foi efetuada por meio da revisão de trabalhos sobre a importância da consideração das fases de uso e fim de vida no ciclo de vida do concreto quanto à emissão de gases do efeito estufa (Green House Gases – GHG) (Wu et al, 2014).

Por meio da revisão é abordado o debate considerável sobre o tratamento sobre as emissões geradas pelas fases de uso e final de vida de produtos e se os resultados das fases deveriam ser incluídos ou não.

Neste trabalho é descrito que a ACV referente às emissões de gases do efeito estufa dos materiais de construção, incluindo o concreto, segue normas internacionais reconhecidas, como a série ISO 14.000. De acordo com essas normas, ambas as avaliações do berço ao portão como do berço ao túmulo podem ser utilizadas como fronteiras do sistema no procedimento quantitativo da ACV.

A justificativa para a exclusão da consideração das fases de uso e fim de vida mais comumente usadas nos casos analisados são (Wu et al, 2014):

- O impacto da fase de uso no ciclo de vida das emissões de gases do efeito estufa do concreto é mínimo;
- O impacto da fase de fim de vida no ciclo de vida das emissões de gases do efeito estufa do concreto é mínimo;
- Existem muitas incertezas nas fases de uso e fim de vida.

Segundo o mesmo trabalho, entretanto, nenhum desses estudos de caso verificados efetuou uma avaliação que justificasse suas decisões em excluir as fases de uso e fim de vida.

O impacto da fase de uso no ciclo de vida quanto aos gases de efeito estufa pode se dar na forma de carbonatação, manutenção e reabilitação, além de outras emissões indiretas. Dependendo da tensão de compressão do concreto e da média de temperatura anual, de 1,4% a 15% de reabsorção pode ser estimada. Outras fontes de emissões indiretas podem afetar o ciclo de vida. O concreto tem um impacto positivo no consumo de energia de edifícios devido a sua grande massa térmica (NIELSEN, 2008). Outras considerações como a localização, características ambientais, densidade populacional, etc., podem ter uma importância significativa (Wu et al, 2014).

Na mesma revisão os autores destacam que o impacto da fase de demolição e remoção de detritos tem relativo baixo impacto comparado à construção ou uso (OCHOA et al, 2002). Similarmente é colocado (JUNNILA et al, 2006) que a fase de fim de vida contribuiu minimamente no valor total dos resultados.

Estes estudos argumentam que a exclusão da fase de fim de vida no quantitativo final é adequada se o concreto for demolido e transportado para aterros. Entretanto tais colocações não levam em conta a recarbonatação do concreto. Uma vez que o concreto foi moído, triturado e estocado no aterro, uma reabsorção de 75% de CO₂, pode ser levada em conta porque muito mais superfície ficará exposta à atmosfera (NIELSEN & GLAVIND, 2007).

Por exemplo aproximadamente 75% de produtos de concreto pré-fabricados carbonatam dentro de 5 anos depois de demolidos e esta carbonatação, combinada com a carbonatação na fase de uso, podem proporcionar 25% de redução do CO₂ emitido no processo de calcinação (KJELLEN et al, 2005).

Em 2011 foi efetuada uma extensa ACV pelo Massachusetts Institute of Technology – MIT no contexto norte-americano, apresentando metodologias para a avaliação do ciclo de vida e uma avaliação limitada do custo do ciclo de vida, das emissões de CO₂ e de edifícios que incorporam concreto em sua estrutura ou sistemas de vedação. (REPORT R11-01, 2001)

Foram comparadas seis tipologias construtivas e estruturais, a saber: residência unifamiliar com 2 pavimentos composta por formas de concreto isolado (insulated concrete forms – ICF), residência unifamiliar com 2 pavimentos composta por painéis leves de madeira, edifício multifamiliar de 4 pavimentos composto por ICF, edifício multifamiliar de 4 pavimentos em madeira, edifício comercial de 12 pavimentos em concreto moldado in loco e edifício comercial com 12 pavimentos em aço. Os edifícios de referência foram escolhidos para servirem de base para os projetos porque os mesmo representam uma média do que existe em termos de construções. A unidade funcional foi a área útil de cada tipologia do edifício. Para uma fácil comparação, os resultados foram transformados em área por m². O tempo de vida útil estimado foi de 60 anos.

As conclusões do trabalho foram:

- O total de potencial de aquecimento global incorporado é aproximadamente 128 a 339 Kg CO₂e/m² da construção residencial e comercial construída em concreto, madeira e aço,

- Em geral, edifícios residenciais em concreto possuem potencial de aquecimento global incorporado em maior quantidade do que a alternativa em madeira, enquanto os edifícios comerciais em concreto são equivalentes à alternativa em aço,
- Em geral, as estruturas de concreto possuem um potencial de aquecimento global incorporado anual menor do que as alternativas em madeira e aço, variando de 3% a 10%,
- Ao longo de um ciclo de vida de 60 anos, na fase de uso, o potencial de aquecimento global incorporado inferior supera o inicialmente igual ou maior para edifícios de concreto. Isto resulta em um ciclo de vida total do potencial de aquecimento global incorporado menor do que os modelos em aço ou madeira. A redução maior foi de 8% para a casa unifamiliar de ICF na cidade de Phoenix,
- Ao longo de um tempo de vida de 60 anos, 88% a 99% das emissões de CO₂ são devidas à energia operacional necessária para todos os edifícios considerados no estudo,
- A substituição de clínquer por material pozolânico, pode reduzir o potencial de aquecimento global dos edifícios em concreto considerados de 7% a 14%,
- Enquanto existem oportunidades na fase de pré-uso no ciclo de vida de edifícios de concreto, existem maiores possibilidades de redução do carbono na fase de uso, incluindo sistemas de tubos de água gelada radiante embutidos em lajes de concreto para resfriamento,
- No caso de edifícios residenciais, a avaliação do ciclo de vida demonstra que a redução da infiltração de ar nas casas em concreto e o aumento na resistência térmica do concreto na montagem das paredes de concreto pode ser econômica e ambientalmente interessante,

O trabalho (REPORT R11-01, 2001) ainda comenta que, melhorar o desempenho ambiental de edifícios de concreto exigirá a atenção da indústria, do governo e da comunidade científica. Por fim, uma série de medidas que podem ser tomadas são indicadas:

- A adoção do projeto do ciclo de vida de novos edifícios por meio do LEED (Leadership in Energy and Environmental Design que é um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações), códigos de construção dos estados e outros meios,
- Incluir no processo da avaliação do ciclo de vida ambos, impactos ambientais e avaliação dos custos para um melhor desempenho ambiental,
- Incluir a avaliação de custos, a redução de equipamentos devido à melhorias no espaço interno da construção,
- Melhorar a formulação e aplicação do concreto em edifícios,
- Desenvolver uma base de dados pública, simulada e medida, de edifícios de concreto para a avaliação com maior precisão da quantidade de concreto e materiais de isolamento na montagem de paredes,
- Realizar testes de campo e documentar o desempenho dos sistemas de condicionamento de ar dos edifícios que melhorem o armazenamento de calor na massa térmica para uma variedade de climas,
- Desenvolver e promover projetos de construção de baixo carbono, complementando os esforços atuais para a especificação da eliminação de pontes térmicas em construção de fachadas, independentemente do material de construção e promover o uso da massa térmica.

Em outro estudo nos Estados Unidos da América realizado por (MILLER et al, 2015) foi avaliado o papel da variação das proporções dos materiais, aspectos geométricos e a idade,

como fatores de projeto visando a redução no potencial de aquecimento global para o concreto estrutural. Foram analisadas quatro unidades funcionais para comparação e com a variação nos traços de concreto. A primeira unidade funcional com volumes de concreto constantes e diferentes traços, a segunda unidade funcional com aplicação em vigas à flexão, a terceira unidade funcional para colunas de concreto com uma carga axial à compressão, e a última unidade funcional foi considerada a estrutura de concreto de um edifício de 10 andares. Em todas as análises foi mantida uma quantidade de aço constante e não foram incorporados seus efeitos na avaliação. A influência da vida útil da estrutura, a durabilidade das diferentes misturas e os efeitos do fim de vida e variações locais e regionais na cadeias de abastecimento e as foram excluídos nas comparações. Foi utilizada para a análise o programa LCA GreenConcrete (o programa é uma ferramenta baseada no MS-Excel desenvolvida para a análise dos impactos ambientais da produção do concreto e seus constituintes, desenvolvida pela universidade de Berkley). As análises foram conduzidas em quatro idades de projeto para examinar a influência do desenvolvimento das tensões das peças e da estrutura de concreto no Potencial de Aquecimento Global. Os resultados demonstraram pode ser reduzido o Potencial de Aquecimento Global com o uso de misturas de concreto alternativas que requerem menos cimento e podem ser obtidas se as idades de projeto forem mais elevadas.

Pela avaliação dos diversos casos descritos anteriormente, verifica-se que uniformidade e critério único da avaliação do ciclo de vida das construções em concreto armado não foi apresentada. Unidades funcionais diferentes, até de determinação discutível, uma vasta gama de métodos de avaliação, sistemas de avaliação, tempo de vida útil, impactos considerados (em geral ênfase na emissão de carbono), etc., tornam necessário um estudo mais completo, justificado quanto às premissas do projeto da ACV e do contexto nacional.

5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.

Em conformidade com o objetivo desta pesquisa, este capítulo apresenta o detalhamento do desenvolvimento experimental adotado para avaliar o uso da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no auxílio da tomada de decisões nas especificações em projetos estruturais de concreto armado, visando a melhoria do desempenho ambiental, que pode ser resumido nas etapas descritas a seguir:

- Definição da aplicação pretendida na pesquisa,
- Definição da unidade funcional a ser analisada,
- Execução do projeto estrutural da unidade funcional com as variações das classes de resistência pretendidas,
 - Organização de quantitativo de materiais de cada modelo estrutural obtido,
 - Organização do fluxo de referência e fronteiras do sistema,
 - Elaboração do Inventário do Ciclo de Vida (ICV),
 - Execução da Avaliação do Impacto do Ciclo de vida (AICV),
 - Interpretações e conclusões dos resultados obtidos.

5.1) Aplicação Pretendida.

O presente estudo visa à avaliação do desempenho ambiental de estruturas de edifícios em concreto armado, por meio de estudo de caso, visando dar ao profissional de projetos estruturais um embasamento científico, sob a perspectiva ambiental, para a tomada de decisões de menor impacto ambiental nos projetos de estruturas.

A metodologia a ser utilizada para tal fim é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em uma estrutura de concreto armado projetada com valores diferentes de resistência característica à compressão, para efeito de análise comparativa, de forma a contabilizar os impactos ambientais de cada uma das alternativas as quais refletem diretamente no consumo de materiais e na dimensão das peças estruturais que compõe a estrutura.

5.2) Limitações do método, suposições e impactos

A única variável será a variação da classe de resistência do concreto. Uma parcela dos dados coletados para este trabalho serão secundários, extraídos de bancos de dados.

5.3) Público alvo do estudo

Este é um estudo científico, destinado a publicação para a academia, direcionando-se principalmente àquelas áreas ligadas à construção civil e aos profissionais da área da construção civil. Portanto, o público-alvo deste trabalho consiste em audiência externa e técnica, compostos de arquitetos e engenheiros civis.

5.4) Estudos comparativos a serem abertos ao público

Este estudo é uma afirmação comparativa e está previsto para ser divulgado ao público.

5.5) Escopo.

5.5.1) Tipos de entregas e aplicações pretendidas.

O presente estudo será desenvolvido na forma de um estudo completo de Avaliação do Ciclo de Vida, abrangendo as fases de Inventário de Ciclo de Vida dos sistemas dos produtos, assim como a Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida, a partir dos dados de inventário. Será um estudo comparativo a ser divulgado à comunidade científica.

No presente trabalho referenciado em estudos anteriores, será utilizada a unidade funcional de um edifício e, para averiguação em conformidade com a prática nacional, será escolhido um edifício padrão conforme a ABNT NBR 12721: 2006 - Avaliação de Custos para Incorporação Imobiliária e outras disposições para Condomínios Edifícios, com as seguintes características padrão, Figura 8:

Residência Multifamiliar	
R8 - Padrão Baixo (R8 - B)	
Composição do edifício:	Pavimento térreo e sete pavimentos tipo.
Descrição dos pavimentos	
Pavimento térreo: Hall de entrada, elevador, escada e quatro apartamentos por andar com dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque. Na área externa estão localizados o cômodo de lixo e trinta e duas vagas descobertas.	
Pavimento tipo: Hall de circulação, escada e quatro apartamentos por andar com dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque.	
Área Real: 2.801,64 m²	

Figura 8 – Edifício padrão conforme a ABNT NBR 12721: 2006 - Avaliação de Custos para Incorporação Imobiliária e outras disposições para Condomínios Edifícios (ABNT NBR 12721:2006)

5.5.2) Função.

O sistema estrutural em concreto armado tem como função principal dar suporte para o edifício, isto é, absorver e transmitir, para as fundações, todos os esforços incidentes, com segurança pré-definida, segundo os requisitos mínimos da ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (2014) (e suas referências normativas) e as prescrições da NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (1980). A classe de agressividade ambiental adotada foi a “moderada” (II) para região urbana. Os cobrimentos considerados das armaduras foram para vigas e pilares de 3,0cm e lajes de 2,5cm.

As solicitações adotadas foram:

Lajes: Sobrecarga permanente = 1 kN/m²

Sobrecarga Acidental = 1,5 kN/m²

Paredes sobre lajes considerada a carga permanente de tijolos furados (onde existirem) = 5 kN/metro linear.

Vigas: Paredes carga permanente tijolos furados = 5 kN/metro linear.

Considerações do vento: Velocidade básica = 35.0 m/s; Fator topográfico (S1) = 1.00; Categoria de rugosidade (S2) = IV-Terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados; Classe da edificação (S2) = B-Maior dimensão horizontal ou vertical entre 20m e 50m; Fator estatístico (S3) = 1.00 - Edificações em geral.

Ainda foram respeitadas as especificações normativas da NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto armado em situação de incêndio (2012) e a IT – 06 Segurança Estrutural das Edificações do Corpo de Bombeiros (2005), quanto ao TRRF (Tempo Requerido de Resistência ao Fogo) e as dimensões mínimas das peças estruturais.

A durabilidade mínima prevista da estrutura de concreto armado é de 50 anos, prevista pela NBR 15575-1 Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais (2012), em referência a NBR 8681: Ações e Segurança nas Estruturas (1984), para sistemas de estruturas como o estudado no presente documento. Então é considerada nesta análise, uma Vida Útil mínima de 50 anos, até a necessidade probabilística de ser efetuada uma manutenção na estrutura, atendendo então às exigências dos usuários quanto à segurança estrutural e um bom desempenho em serviço,

5.5.3) Unidade Funcional.

A estrutura de uma edificação funciona holisticamente, com a interação entre todos os componentes com suas funções interligadas. Não existe a possibilidade em se determinar a função por pilares, vigas e lajes isoladamente. Uma peça estrutural pode exercer várias funções na estrutura, dependendo das solicitações externas e internas, dependentes também da interação entre elas. Como analogia, pode-se comparar os dedos de uma mão: são todos “dedos” mas com funções diferenciadas e dependendo da atividade exercida com variações. Portanto, para a Avaliação do Ciclo de Vida da estrutura foi adotada neste trabalho a unidade funcional da estrutura completa da edificação, o reticulado estrutural completo.

O edifício analisado é semelhante ao modelo da NBR 12.721:2006 descrito anteriormente e composto por pavimento térreo, 8 pavimentos tipo, cobertura, escadas e reservatório superior, todos os componentes, lajes (maciças) vigas e pilares, em concreto armado, conforme a planta de arquitetura e de formas da estrutura (para a classe de concreto C25 de referência) do pavimento tipo, conforme figura 9. O edifício adotado para a análise é existente, não é idêntico ao padrão citado, inclusive possui um andar a mais, mas atende às

características do padronizado. A área estrutural (sem revestimentos, área da estrutura de concreto), obtida foi de 2.078 m², conforme a vista 3D da figura 10 e a unidade funcional é um edifício com as características descritas com a função de suportar a carga característica de 5,5 kN/m² e demais solicitações (quase permanentes, excepcionais, etc.) sem contar o peso próprio da estrutura (que será variável com a modificação das peças estruturais devido à diferentes classes de concreto empregadas).

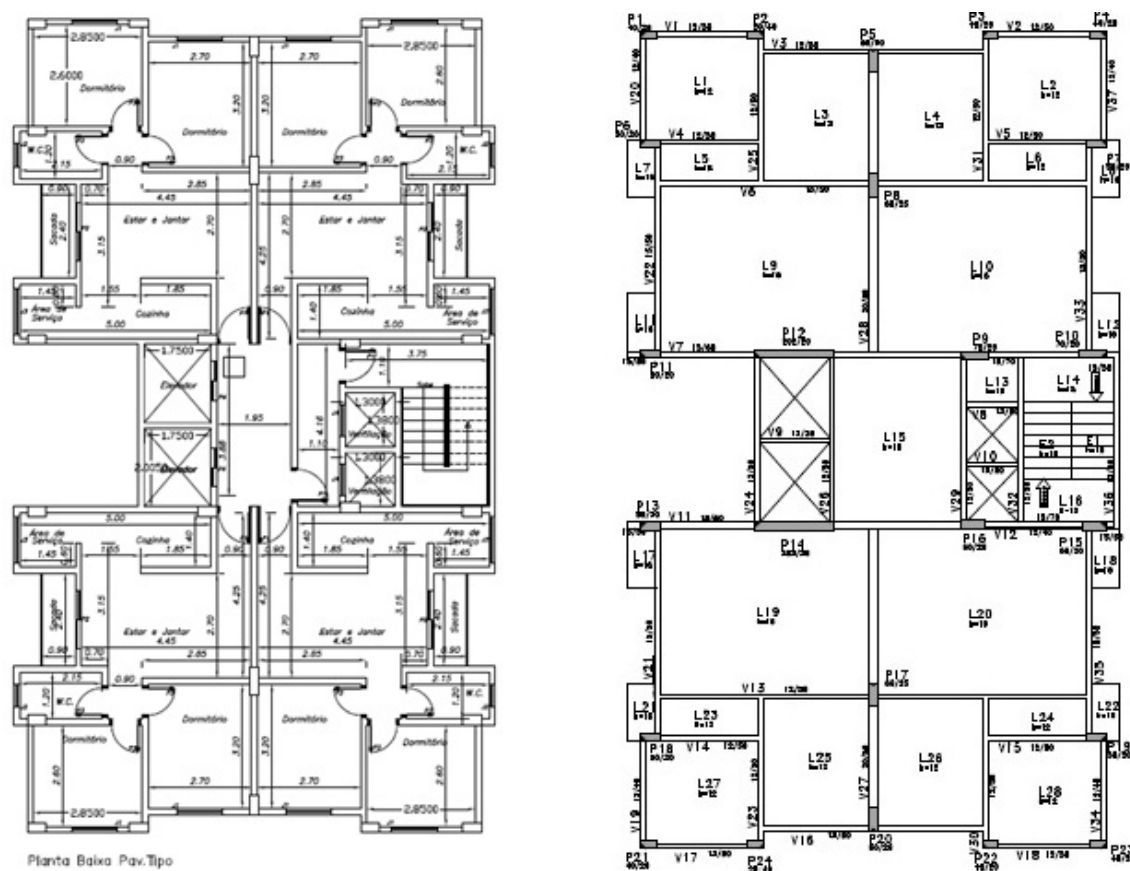


Figura 9 – Planta de arquitetura e forma da estrutura do do pavimento Tipo do edifício em análise (s/escala)

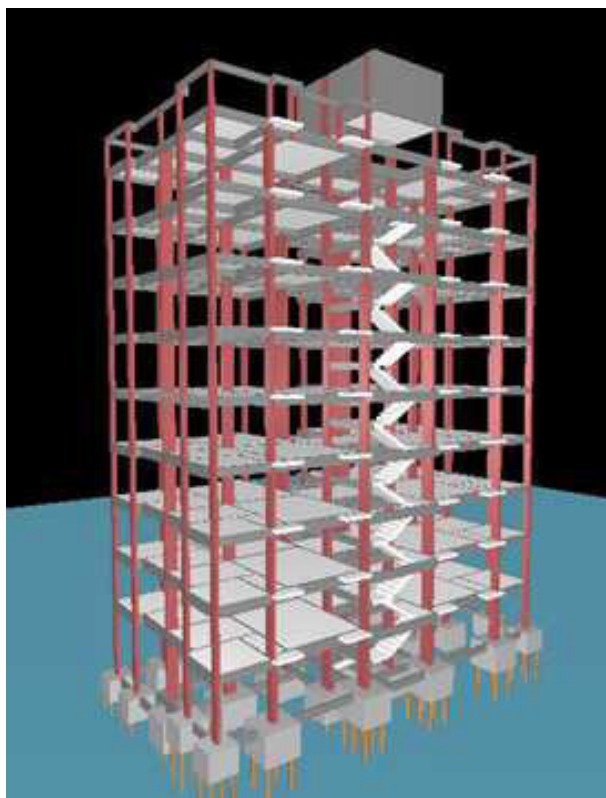


Figura 10 – Vista 3D da estrutura projetada

5.5.4) Fluxo de referência.

No trabalho foi utilizado o fluxo de referência ajustado para a seguinte unidade dimensional: substância / m² de edificação.

Foi efetuado o projeto estrutural do edifício com 6 classes de resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) do grupo I de resistência, a partir da classe C25, segundo classificação da NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação de grupos de resistência (2009), para a análise comparativa:

Classe C25 = resistência característica à compressão de 25 MPa,

Classe C30, = resistência característica à compressão de 30 MPa mantidas as mesmas dimensões das peças estruturais de Classe 25.

Classe C35 = resistência característica à compressão de 35 MPa com redução das dimensões das peças proporcionado pelo aumento do f_{ck} .

Classe C40 = resistência característica à compressão de 40 MPa com redução das dimensões das peças proporcionado pelo aumento do f_{ck} .

Classe C45 = resistência característica à compressão de 45 MPa com redução das dimensões das peças proporcionado pelo aumento do f_{ck} .

Classe C50 = resistência característica à compressão de 50 MPa com redução das dimensões das peças proporcionado pelo aumento do f_{ck} .

Para a execução do projeto estrutural foi utilizado o software nacional CAD/TQS[®] de cálculo, análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado na sua versão 18.17.

Durante o processo de concepção da estrutura, partiu-se no projeto com a utilização da classe de resistência C25 até as dimensões mínimas das peças estruturais, lajes maciças, vigas e pilares, atingirem as mínimas condições de segurança estrutural e comportamento em serviço.

O procedimento seguinte foi apenas na alteração da classe de resistência do concreto, sem a alteração nas dimensões dos componentes estruturais, para a classe C30 e tal procedimento teve por objetivo a verificação do comportamento e tendências dos resultados obtidos. Nas classes de concreto seguintes, C35, C40, C45 e C50, foi efetuada a redução progressiva nas dimensões de vigas e pilares de 5cm em 5cm e nas lajes de 1cm em 1cm até serem atingidas as menores dimensões possíveis e com o atendimento das condições de segurança e serviço.

Quando da tentativa de redução das peças estruturais da classe C45 para a C50, verificou-se a impossibilidade na operação devido à prescrições normativas e de estabilidade. Foram então mantidas as dimensões da C40 e em seguida foi efetuado o cálculo da estrutura da classe C50.

5.5.4.1) Quantitativos de materiais.

O fluxo de materiais para o consumo de concreto foi efetuado baseado nos traços fornecidos por usina de concreto, tratando-se de dados primários, a seguir descritos. As suas características, fontes de dados e demais informações são explicitadas nos itens seguintes relativos ao escopo geográfico, temporal, tecnológico e na obtenção das fronteiras do sistema.

Classe 25 para cada m³ de concreto:

Cimento: 310 kg

Areia: 870 kg = 0,53 m³ areia / m³ concreto

Brita: 930 kg = 0,52 m³ brita / m³ concreto

Água: 180 kg (ou litros)

Classe 30 para cada m³ de concreto

Cimento: 340 kg

Areia: 770 kg = 0,47 m³ areia / m³ concreto

Brita: 970 kg = 0,54 m³ brita / m³ concreto

Água: 185 kg (ou litros)

Classe 35 para cada m³ de concreto:

Cimento: 370 kg

Areia: 744 kg = 0,45 m³ areia / m³ concreto

Brita: 960 kg = 0,53 m³ brita / m³ concreto

Água: 190 kg (ou litros)

Classe C40 para cada m³ de concreto:

Cimento: 389 kg

Areia: 739 kg = 0,45 m³ areia / m³ concreto

Brita: 1031 kg = 0,57 m³ brita / m³ concreto

Água: 177 kg (ou litros)

Classe C45 para cada m³ de concreto:

Cimento: 405 kg

Areia: 734 kg = 0,45 m³ areia / m³ concreto

Brita: 1035 kg = 0,58 m³ brita / m³ concreto

Água: 173 kg (ou litros)

Classe C50 para cada m³ de concreto:

Cimento: 421 kg

Areia: 730 kg = 0,44 m³ areia / m³ concreto

Brita: 1038 kg = 0,58 m³ areia / m³ concreto

Água: 169 kg (ou litros)

5.5.5) Escopo Geográfico.

O escopo geográfico é de um edifício localizado na região Sudeste em uma cidade no sul do estado de Minas Gerais, com aproximadamente 150.000 habitantes. Os materiais componentes do sistema do produto foram todos considerados em relação à localização da cidade.

5.5.6) Escopo temporal.

Segundo uma previsão do impacto futuro de três forças: crescimento populacional, urbanização e consumo irresponsável e esbanjador dos recursos naturais, que nos trouxeram ao estado atual de desenvolvimento insustentável, conforme comentado por (MEHTA, 2002 apud MEHTA; MONTEIRO, 2008), vide figura 11, com taxa anual de consumo de concreto, espera-se que a demanda por concreto cresça para cerca de 16 bilhões de toneladas pelo ano de 2050. A partir de então, o consumo deve começar a cair dependendo do cumprimento dos princípios de ecologia industrial e a melhoria de durabilidade das estruturas construídas atualmente.

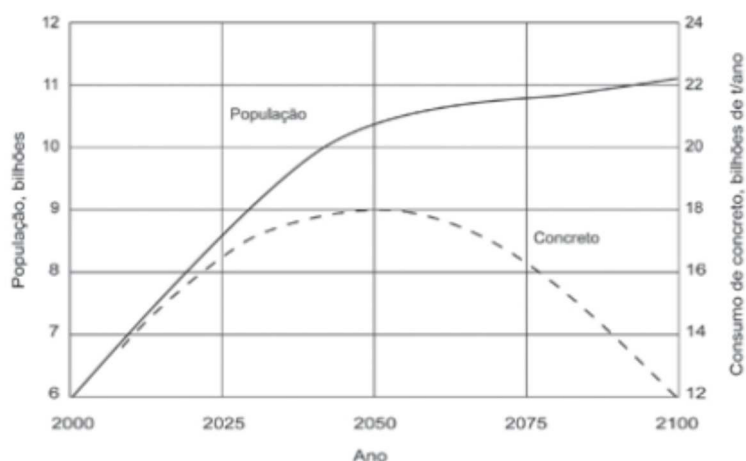


Figura 11 – Projeções de consumo de concreto (MEHTA, 2002 apud MEHTA; MONTEIRO, 2008)

Embasada nesta previsão, a representatividade temporal prevista para esse trabalho é de no mínimo 50 anos.

5.5.7) Escopo tecnológico.

Para que os dados de inventário possam representar de forma válida os impactos ambientais de um sistema, eles devem ter representatividade e adequação, abrangendo a coleta de dados relacionados à tecnologia, geografia e tempo.

O escopo tecnológico deste estudo está diretamente relacionado aos processos apresentados no sistema do produto. Portanto, os dados a serem coletados na fase de ICV devem corresponder a entradas e saídas desses processos. O escopo tecnológico é considerado atual e estático, pois serão consideradas as tecnologias atualmente utilizadas, sem previsões de desenvolvimento de novas tecnologias.

5.5.8) Estrutura de modelagem do Inventário do Ciclo de Vida.

Este estudo utilizará o modelo atribucional de ciclo de vida, o qual descreve os impactos potenciais ambientais que podem ser atribuídos a um sistema ou produto sobre a sua ACV. Modelos atribucionais fazem uso registros históricos, fatos embasados, dados de medição de conhecidas incertezas, e inclui todos os processos que são identificados como relevantes contribuições para o sistema a ser estudado.

5.5.9) Obtenção da fronteiras do sistema em estudo.

Para a modelagem da ACV, as fronteiras do estudo serão divididas em 4 processos elementares: estrutura de concreto armado (materiais e mistura na usina), distribuição do concreto à obra (transporte), fase de uso e deposição final em aterro.

O processo elementar de produção da estrutura de concreto armado é alimentado pelos processos secundários de produção do cimento (extração das matérias-primas, produção e transporte do cimento à usina), processo de produção do aço (extração das matérias-primas, beneficiamento do aço na siderúrgica e transporte à obra), processo de produção da pedra britada (extração, produção e transporte), processo de produção da areia (extração e transporte), processo de produção da madeira para formas (extração e transporte), mais o processo da água consumida para o concreto e energia.

O fluxograma do sistema do produto é apresentado na figura 12.

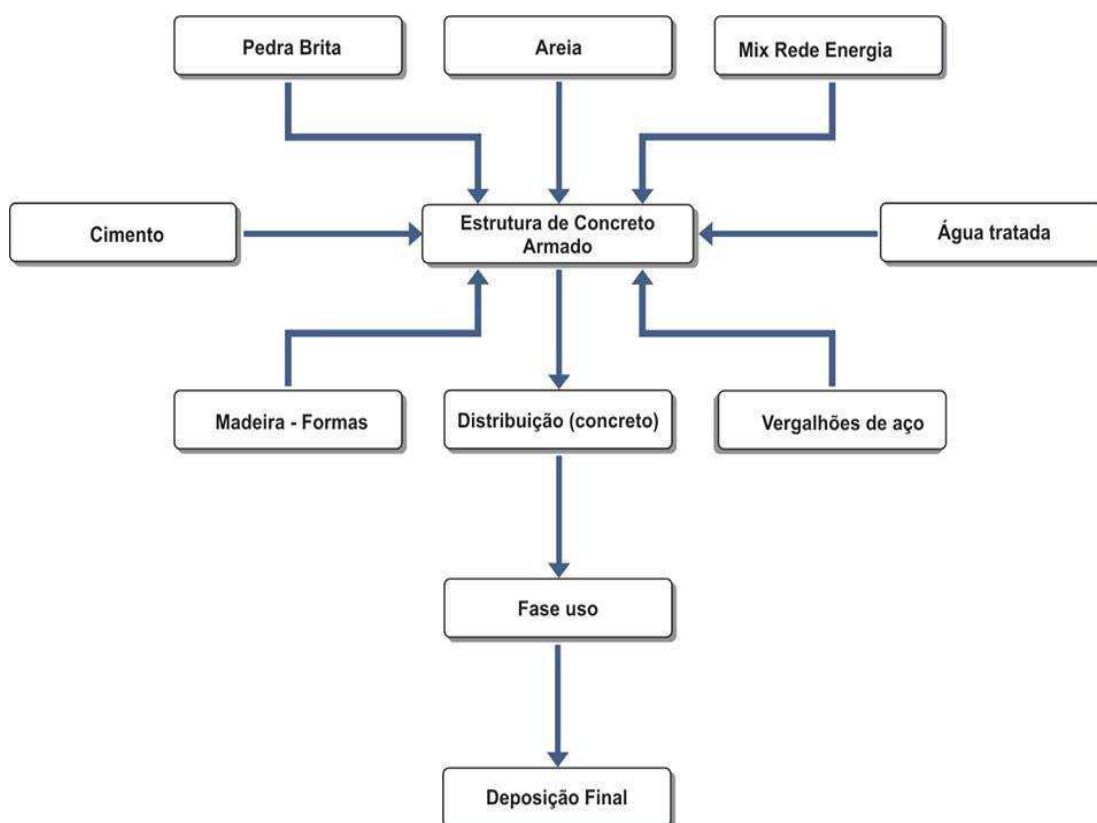


Figura 12 – Fluxograma do sistema de produto da estrutura de concreto armado

A descrição dos processos produtivos é descrita a seguir:

Processo elementar de produção da estrutura de concreto:

Inclui os materiais e a fabricação do concreto.

Observações: foram utilizados dados estatísticos primários de uma usina de concreto em uma cidade no sul de Minas Gerais, analisados quanto aos traços descritos no item 5.5.4.1 e consumo de água nos procedimentos de limpeza. Os processos produtivos secundários contribuintes são descritos a seguir:

- Processo de produção do Cimento:

Refere-se à fabricação de cimento. O cimento utilizado foi o CP III 40 RS da fábrica de cimento Holcim, localizada em Barroso, MG. As informações referentes ao consumo das matérias primas e transporte, foi baseada em informações extraídas da “Declaração Ambiental do Produto”, fornecida pela empresa. O processo produtivo engloba a extração, tratamentos e o transporte das matérias-primas até a fábrica de cimento. O material pozolânico (escória granulada de alto-forno) foi considerada apenas na redução da porcentagem dos materiais constituintes do cimento. No caso, a composição básica do cimento segundo a fabricante foi de 36% de clínquer, 55% de escória, 4% de gesso e 5% de calcário. O consumo de energia e recursos materiais para a produção do cimento e suas emissões, inclusive as devidas ao transporte até a usina de concreto, foram considerados. A distância da usina de fabricação do cimento até a usina de concreto foi determinada por dados primários obtidos por ambas, fábrica de cimento e usina de concreto, consideraram-se 400km.

As perdas de concreto usinado e do aço foram baseadas no relatório final do projeto “Alternativas para a Redução de Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obras” (FINEP, 2011), desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Tecnologia e Qualidade da Construção (ITQC). Analisando-se o trabalho, foram consideradas as perdas de 10% para ambos, o concreto usinado e aço.

- Processo de produção do aço:

Engloba as atividades de extração das matérias-primas, transporte e transformação na siderúrgica, onde é produzido o aço para a confecção da armadura das peças estruturais bem como o transporte dos vergalhões de aço até a cidade considerada. Neste estudo baseado em dados primários foi considerada a distância de 450km da empresa ArcelorMittal em Belo Horizonte - MG.

- Processo de produção da areia:

Engloba as atividades de extração e transporte. Quanto ao transporte da areia aos centros consumidores, a distância máxima para a viabilização econômica do processo é de 150km (ROSSI, 2013). A distância adotada quanto ao transporte da areia à usina de concreto foi adotada de 100km, considerada realista na região estudada.

- Processo de produção da pedra britada:

Engloba as atividades de extração e transporte. Quanto ao transporte da pedra britada aos centros consumidores a distância máxima para a viabilização econômica do processo é de 150km (ROSSI, 2013). A distância adotada quanto ao transporte da areia à usina de concreto foi adotada de 100km, considerada realista na região estudada.

- Processo de produção da madeira para formas:

As formas de madeira são as mais utilizadas na maioria dos estados do país e normalmente constituídas de painéis de madeira compensada, tábuas e pontaletes de madeira serrada, ou unicamente com estes dois últimos, de acordo com Nazar (2007). A distância considerada até o local de montagem de 1.956km de distância (John et al, 2005), conforme descrito no item 2.6.

No trabalho quanto às formas de madeira, foi considerada a tábua serrada e o consumo de formas nos quantitativos, sem a consideração de cimbramentos e escoramentos

e uma consideração de reaproveitamento de duas vezes. Este parâmetro foi adotado baseado na observação da prática local e referência (GIAMUSSO, 1988). Foi admitida a compensação no cômputo geral da não consideração favorável de maior reaproveitamento pela não consideração dos escoramentos resultando em um cenário considerado realista.

A consideração em tábuas de madeira foi devido às observações de (Oliveira, 2007) no item 2.6 quanto à única disponibilidade para a avaliação da magnitude dos impactos de utilização da madeira para formas ser o transporte até o local de confecção.

- Consumo de água e energia:

Foram considerados o consumo de água descrito nos traços de cada classe de resistência de concreto, além da água consumida em procedimentos de limpeza de caminhões, caminhões bomba e dentro da usina, tendo sido fornecido o incrível valor de 200 litros por m³ de concreto produzido, segundo dados fornecidos pela usina de produção de concreto na cidade considerada.

Processo elementar de distribuição do concreto:

Foi adotada a distância máxima, baseada em dados primários fornecidos pela empresa de produção do concreto na região de estudo de 60km de distância, sendo a distância equivalente percorrida por caminhões betoneira, caminhões bomba e veículos de apoio.

Processo elementar – Fase de Uso:

Corresponde a fase de uso da estrutura. A ACV por ter o seu escopo temporal com o valor da vida útil de estrutura, não irá requerer manutenção e suas consequências neste período. Entretanto foi considerada a absorção de CO₂ pela estrutura com o passar dos anos.

Vários estudos mostram que pequenas quantidades de CO₂ são reabsorvidas pelo concreto, posteriormente, até décadas depois do concreto ser lançado, quando os elementos do material se combinam com o CO₂ para formar a calcita. Em um estudo recente

(HASELBACH, 2011), sugere-se que a reabsorção pode ir além da formação da calcita, aumentando a quantidade total de CO₂ removido da atmosfera, diminuindo o rastro de carbono geral do concreto. Verificando-se os trabalhos de (HASELBACH, 2011) e (MIRZA et al, 2006), pode se considerar um valor mínimo de absorção no período de 5% do CO₂, emitido na fabricação do cimento.

Processo elementar – Deposição Final:

Os resíduos provenientes da construção civil, ou simplesmente o entulho são parte integrante dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e merecem atenção especial, visto que são resíduos produzidos em grande quantidade. Além disso, verifica-se cada vez mais, a falta de áreas disponíveis para a deposição correta desses resíduos, assim como dos RSU produzidos nas cidades de médio e grande porte (AQUINO et al, 2005).

Quanto às deposições irregulares dos resíduos da construção civil no ambiente urbano, pode-se concluir que elas são o resultado da inexistência de soluções eficazes para a captação destes resíduos, da falta de uma fiscalização eficiente e, até mesmo, da falta de uma conscientização da população quanto aos danos provocados pelos descartes indiscriminados do entulho em locais inadequados. As disposições irregulares dos resíduos da construção civil no ambiente urbano geram problemas de ordem ambiental, social e econômica, pois comprometem o meio ambiente, promovem a redução da qualidade de vida da população e aumentam os custos com a limpeza urbana (BARROS, 2004).

A reciclagem tem surgido como uma forma de amenizar a ação nociva dos resíduos no ambiente urbano, gerando ainda novos produtos comercializáveis. Desta forma, os agregados reciclados podem ser utilizados em diversos novos produtos, como argamassas, concretos e blocos de construção. Entretanto, um entrave para a aplicação dos agregados reciclados de resíduos da construção civil é a possível variabilidade de sua composição, apresentando

diferentes percentuais de argamassa, concreto, materiais cerâmicos e outros (gesso, asfalto, madeira) e de outras propriedades, como granulometria, absorção e massa específica. Ainda, segundo os autores, não se conhecem exatamente os efeitos que essa variação pode acarretar no desempenho dos produtos gerados pela reciclagem.

De acordo com Resolução do (CONAMA, 2002), os resíduos da construção civil deverão ser destinados das seguintes formas:

- Classe A, são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

- Classe B, são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

- Classe C, são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

- Classe D, são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.: deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. Ainda grandes geradores deverão elaborar Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil que contemplarão o ciclo da triagem, na origem ou em áreas de destinação licenciadas para essa finalidade; os resíduos classe A deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a áreas de aterros de resíduos da construção (CONAMA, 2002).

No presente trabalho, avaliando-se a atual condição brasileira, dada as dificuldades e incertezas no reaproveitamento do concreto como agregado reciclado, optou-se por considerar que todo o concreto irá para a deposição final em aterro a uma distância de até 100km. Para este estudo também não está sendo considerada a futura possível reciclagem do aço.

5.5.10) Preparação do embasamento para a avaliação do impacto.

Como este estudo se trata de uma afirmação comparativa a ser divulgada ao público, a seleção do método de AICV a ser aplicado, assim como dos níveis de avaliação (midpoint ou endpoint), teve que ser feita durante a definição inicial do escopo, da mesma forma que as

decisões a respeito da possibilidade de inclusão das fases de normalização e ponderação (Joint Research Centre of the European Commission, 2010).

A partir da realização do ICV, foi possível a realização da Avaliação do Impacto do Ciclo de vida (AICV). Para isso foi realizada a classificação dos impactos e sua posterior caracterização. O fator de caracterização utilizado empregou o método EDIP 1997 (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997). A sigla EDIP significa Environmental Design of Industrial Products, sendo um método de AICV desenvolvido na Dinamarca, em 1996, pela Universidade Tecnológica da Dinamarca que disponibilizou o EDIP 1997.

Posteriormente, o EDIP 1997 foi atualizado, sendo disponibilizada uma versão mais recente do método, o EDIP 2003. Esta versão trouxe melhorias para as categorias de impacto utilizadas por ter contemplado modelos de caracterização menos globais e mais regionalizados, com o foco para as condições da Europa (HAUSCHILD; POTTING, 2005).

O método EDIP 1997 também é um dos indicados por sua abrangência de aplicação global, visto que não existem métodos desenvolvidos para o Brasil, nem para a América do Sul (MENDES, 2013).

Por esta razão, devido a este estudo ter sido efetuado no Brasil, optou-se pela adoção do EDIP 1997 como método base mais adequado às condições brasileiras que são diferentes das europeias, como condições de produção de materiais, distâncias e tipologias de transportes, etc.

5.5.11) As fontes de dados, qualidade, incertezas e sua representatividade.

Os principais tipos de dados coletados no estudo de ICV integrante deste trabalho foram aqueles ligados às entradas e saídas de massa, água e energia, dos sistemas de produto

anteriormente descritos. As principais entradas e saídas desses sistemas estão representadas em seu fluxograma, podendo ser identificados novos fluxos significantes no decorrer das iterações do estudo e da coleta de dados.

Este estudo é baseado majoritariamente em dados secundários, que foram obtidos de fontes fidedignas, comprovados cientificamente e devidamente documentados/ publicados pelos autores que os obtiveram. Diante da obtenção de dados primários, estes substituem os secundários. A fase de coleta de dados e principalmente, a escolha da fonte de tais informações, leva em conta os escopos tecnológico, geográfico e temporal descritos no item anterior.

5.5.12) Pressupostos e comparabilidade entre os sistemas.

Este estudo de ACV destina-se à comparação de um mesmo sistema estrutural de concreto armado e é destinado a ser publicado em meios científicos, a fim de servir de apoio ao profissional de projetos estruturais em concreto armado, com embasamento científico, sob a perspectiva ambiental, para a escolha de componentes estruturais de menor impacto ambiental para a composição da estrutura de um edifício.

6. Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A partir da coleta de dados primários e secundários referentes ao estudo, e utilizando a unidade funcional estudada, foi realizado o ICV. Como se trata de um estudo comparativo, vale salientar que foram estudadas as seis resistências de concreto.

Os resultados do consumo de materiais da unidade funcional para a execução da estrutura bem como seus índices são apresentados nos quadro 2 da C25, quadro 3 da C30, quadro 4 da C35, quadro 5 da C40, quadro 6 da C45 e quadro7 da C50.

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço		
	Consumo (m ³)	Taxa (m ³ /m ²)	Consumo (m ²)	Taxa (m ² /m ²)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m ²)	Taxa (kg/m ³)
TAMPA RESERVATORIO	11.7	0.44	140.7	5.3	906.5	34.0	77.1
FUNDO RESERVATORIO	14.7	0.33	183.3	4.1	1437.3	32.2	97.6
COBERTURA	46.8	0.22	453.7	2.2	3645.8	17.3	77.9
2º ao 8º PAV. TIPO	336.4	0.22	3206.4	2.1	29194.5	18.9	86.8
1º PAVIMENTO Tipo	48.9	0.22	457.2	2.1	4496.2	20.5	92.0
TERREO 2	8.2	0.54	101.7	6.8	1565.5	104.5	191.9
TERREO 1	4.7	0.29	53.8	3.3	373.6	22.7	78.9
TOTAL	471.4	0.23	4596.8	2.2	41619.2	20.0	88.3

Quadro 2: Consumos de material e índices da Estrutura Classe C25

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço		
	Consumo (m3)	Taxa (m3/m2)	Consumo (m2)	Taxa (m2/m2)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m2)	Taxa (kg/m3)
TAMPA RESERVATORIO	11.7	0.44	140.7	5.3	898.8	33.7	76.5
FUNDO RESERVATORIO	14.7	0.33	183.3	4.1	1435.6	32.1	97.5
COBERTURA	46.7	0.22	452.7	2.1	3649.9	17.3	78.1
PAVIMENTO TIPO	336.4	0.22	3206.4	2.1	28245.2	18.3	84.0
1o PAVIMENTO	48.9	0.22	457.2	2.1	4211.5	19.2	86.2
TERREO 2	8.2	0.54	101.7	6.8	1305.3	87.1	160.0
TERREO 1	4.7	0.29	53.8	3.3	384.5	23.4	81.2
TOTAL	471.4	0.23	4596.8	2.2	40130.8	19.3	85.1

Quadro 3: Consumos de material e índices da Estrutura Classe C30

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço		
	Consumo (m3)	Taxa (m3/m2)	Consumo (m2)	Taxa (m2/m2)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m2)	Taxa (kg/m3)
TAMPA RESERVATORIO	11.7	0.44	140.7	5.3	931.6	34.9	79.3
FUNDO RESERVATORIO	14.7	0.33	183.3	4.1	1536.0	34.4	104.3
COBERTURA	38.5	0.18	437.5	2.1	3430.0	16.3	89.2
PAVIMENTO TIPO	282.0	0.18	3105.3	2.0	28216.2	18.3	100.0
1o PAVIMENTO	41.0	0.19	441.0	2.0	4050.1	18.5	98.7
TERREO 2	8.2	0.54	101.7	6.8	1045.2	69.7	128.1
TERREO 1	4.8	0.29	55.2	3.3	387.1	23.2	79.8
TOTAL	401.0	0.19	4464.6	2.1	39596.1	19.1	98.7

Quadro 4: Consumos de material e índices da Estrutura Classe C35

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço		
	Consumo (m3)	Taxa (m3/m2)	Consumo (m2)	Taxa (m2/m2)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m2)	Taxa (kg/m3)
TAMPA RESERVATORIO	11.7	0.44	140.7	5.3	974.6	36.5	82.9
FUNDO RESERVATORIO	12.8	0.29	175.7	3.9	1498.3	33.5	116.8
COBERTURA	34.7	0.16	413.6	2.0	3650.5	17.3	105.3
PAVIMENTO TIPO	249.1	0.16	2980.0	1.9	31554.9	20.4	126.7
1o PAVIMENTO	37.1	0.17	422.9	1.9	4240.2	19.3	114.3
TERREO 2	6.6	0.46	87.0	6.0	1170.3	80.5	176.1
TERREO 1	3.6	0.22	46.7	2.8	418.0	25.0	114.6
TOTAL	355.6	0.17	4266.6	2.05	43506.8	20.9	122.3

Quadro 5: Consumos de material e índices da Estrutura Classe C40

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço		
	Consumo (m3)	Taxa (m3/m2)	Consumo (m2)	Taxa (m2/m2)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m2)	Taxa (kg/m3)
TAMPA RESERVATORIO	11.7	0.44	140.7	5.3	1033.5	38.7	88.0
FUNDO RESERVATORIO	12.8	0.29	175.7	3.9	1538.4	34.4	119.9
COBERTURA	34.7	0.16	413.6	2.0	3837.4	18.2	110.7
PAVIMENTO TIPO	242.4	0.16	2980.0	1.9	31747.4	20.5	131.0
1o PAVIMENTO	37.1	0.17	422.9	1.9	4282.3	19.5	115.4
TERREO 2	6.6	0.46	87.0	6.0	1074.1	73.9	161.6
TERREO 1	3.6	0.22	46.7	2.8	425.2	25.4	116.6
TOTAL	348.9	0.168	4266.6	2.05	43938.3	21.1	125.9

Quadro 6: Consumos de material e índices da Estrutura Classe C45

Pavimento	Concreto		Fôrmas		Aço		
	Consumo (m3)	Taxa (m3/m2)	Consumo (m2)	Taxa (m2/m2)	Consumo (kg)	Taxa (kg/m2)	Taxa (kg/m3)
TAMPA RESERVATORIO	11.7	0.44	140.7	5.3	1033.5	40.1	90.9
FUNDO RESERVATORIO	12.8	0.29	175.7	3.9	1538.4	34.6	120.4
COBERTURA	34.7	0.16	413.6	2.0	3818.8	18.1	110.2
PAVIMENTO TIPO	242.4	0.16	2988.0	1.9	31664.2	20.5	130.6
1o PAVIMENTO	37.1	0.17	422.9	1.9	4227.1	19.3	114.0
TERREO 2	6.6	0.46	87.0	6.0	1005.8	69.2	151.3
TERREO 1	3.6	0.22	46.7	2.8	417.3	25.0	114.4
TOTAL	348.9	0.168	4266.6	2.05	43704.7	21.0	125.3

Quadro 7: Consumos de material e índices da Estrutura Classe C50

Por meio da transposição dos índices referentes aos consumo de concreto/m² e aplicando o consumo de cimento/m² (dados do item 5.5.4.1) é apresentado o gráfico da figura 13.

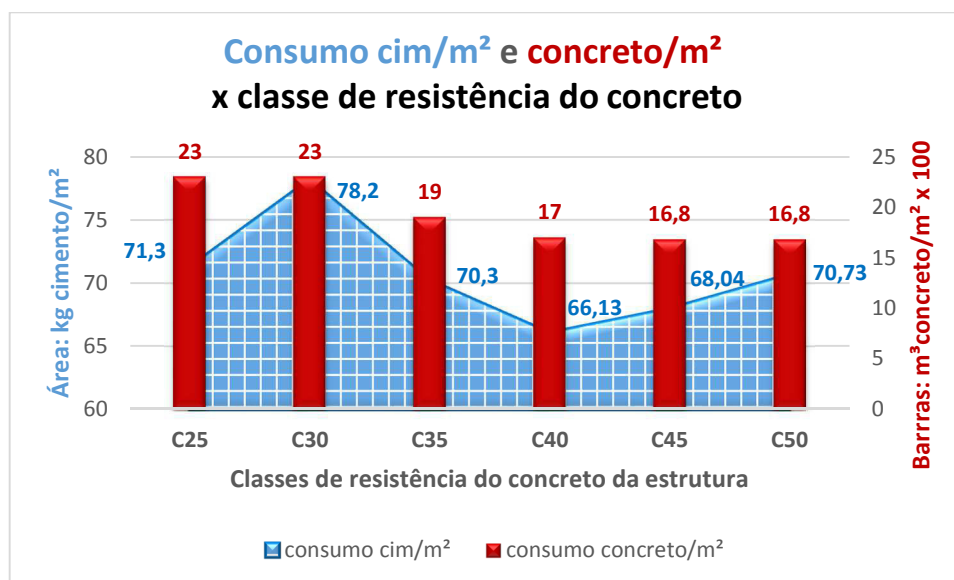


Figura 13 – Gráfico de consumo de cimento/m² e concreto/m² x

Classe de resistência do concreto da estrutura

Pela figura 13, pode ser melhor observado que a classe C40 tem o menor índice de consumo de cimento/m² em peso, 66,13 kg/m², apesar de não apresentar o menor índice de consumo de concreto/m² em volume, 17m³/m², superior as classe C45 e C50 ambas com 16,8m³/m².

As classes C45 e C50, apesar de terem sofrido maior redução dos volumes de concreto em relação a classe C40, apresentaram um consumo de cimento/m² maior em relação a elas mas ainda inferiores à classe C25 de referência e a C30 (que não sofreu redução nas peças estruturais em relação à C25).

Tais informações serão de valia nas análises posteriores de algumas categorias de impacto potencial que deverão ser feitas pela massa de materiais.

No caso do consumo de aço, por meio da transposição dos índices referentes aos consumo de aço/m³ de concreto e aço/m² área estrutural, é apresentado o gráfico constante da figura 14.

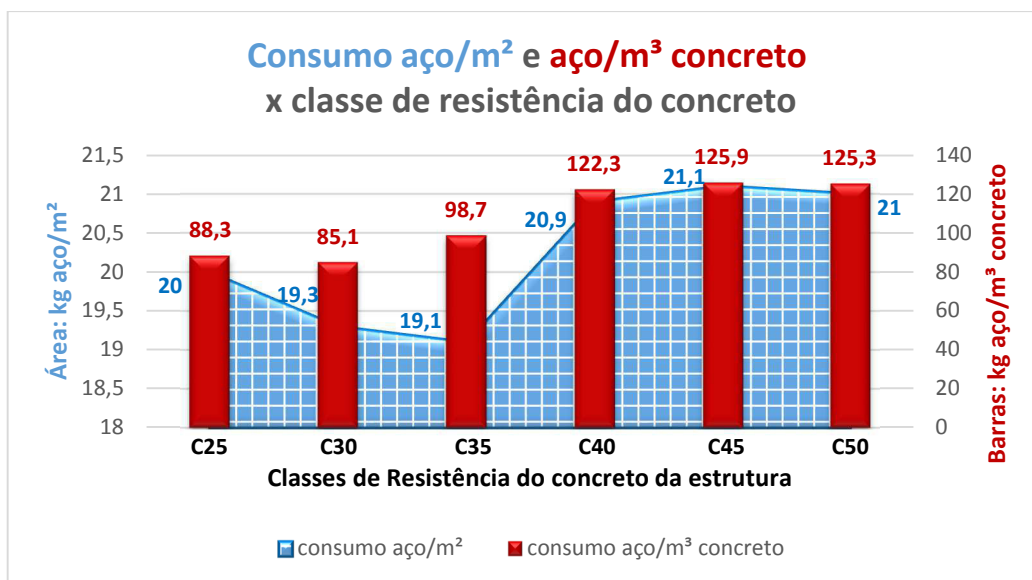


Figura 14 – Gráfico de consumo de aço/m² e aço/m³ de concreto x

Classe de resistência do concreto da estrutura

Por meio da figura 14 pode ser observado que a classe C35 tem o menor índice de consumo de aço/m² em peso, 19,1 kg/m², apesar de não apresentar o menor índice de consumo de aço/m³ de concreto, 98,7 kg/m³. Com a redução da seção pelo aumento da classe de resistência do concreto ocorreu a redução da massa de aço/m² estrutural.

Para as estruturas com classe de resistência superiores à mesma, C40, C45 e C50, ocorreram os aumentos de ambos os parâmetros proporcionalmente, mostrando-se não tão vantajoso, para o caso do aço, a redução da seção para essa classe de resistência de referência, no que diz respeito ao consumo por m² estrutural pelas massas de aço verificadas.

7. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A partir da definição do ICV, foi possível proceder a obtenção dos resultados da AICV. Para isso foi realizada a classificação dos impactos e sua posterior caracterização sendo que para a execução de tal tarefa fez-se o uso do software específico, o *GaBi Product Sustainability Software*, para uma avaliação mais precisa, adquirido para a linha de pesquisa em desenvolvimento pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP de São Carlos.

Trata-se de uma ferramenta de modelação para complexos sistemas produtivos, desenvolvida pela organização PE International GmbH. O GaBi é uma ferramenta para a verificação da sustentabilidade de produtos pela Avaliação do Ciclo de Vida desenvolvida para as seguintes aplicações empresariais indicadas pela empresa: Avaliação do Ciclo de Vida; Custos de Ciclos de Vida; Relatórios do Ciclo de Vida; Ciclo de Vida do Ambiente de Trabalho. É um software utilizado por diversas empresas multinacionais (THINKSTEP GABI, 2016).

A documentação de banco de dados GaBi fornece informações sobre conjuntos de dados que são baseados em know-how de cooperação de longo prazo com a indústria, bem como patente, técnica e literatura científica, fazendo com que os bancos de dados Gabi torne-se dos bancos de dados mais abrangentes de ICV em todo o mundo. A documentação de metadados dos conjuntos de dados do GaBi está em consonância com as recomendações da documentação da *International Reference Life Cycle Data System" (ILCD) Entry Level Conformity Rules of the European Commission's European Platform on Life Cycle Assessment* (EUR 24892 – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability, 2012). Por conseguinte, a documentação da GaBi bancos de dados inclui critérios do formato ILCD, criados por JRC-IES da Comissão Europeia, Plataforma Europeia sobre a Avaliação do Ciclo de

Vida, Copyright (C), Comissão Europeia. Todos os direitos reservados (ibid). As fontes de dados do GaBi utilizadas na ACV, encontram-se descritas nos anexos ao final do trabalho.

Não foi realizada nenhuma etapa opcional (normalização e/ou ponderação), tendo em vista que se trata de um estudo comparativo em que estas etapas não são aconselhadas (Joint Research Centre of the European Commission, 2010).

Nos ítems seguintes são apresentadas as descrições das características dessas categorias de impacto e os comentários dos resultados obtidos na análise das estruturas com a variação da classe de resistência pelo método EDIP 1997.

Cumprir observar que, para a uma melhor compreensão e avaliação do estudo, os resultados foram convertidos a 1 m² da unidade funcional a qual foi, conforme descrito anteriormente, determinada como estrutura completa do edifício. Os resultados das categorias de impacto e consumo de recursos naturais de cada classe de resistência são apresentados no quadro 8 a seguir.

Para cada categoria de impacto e consumo de recursos naturais é apresentada uma figura com um gráfico de barras do resultado para cada classe de resistência, referido ao quadro 8. Também é apresentada para cada categoria de impacto e consumo de recursos naturais as figuras com a representação e valores em gráfico de barras das contribuições dos processos de produção (distribuição do concreto da usina, produção dos materiais componentes da estrutura de concreto e deposição final) para a classe de referência C25.

Por fim, as análises foram finalizadas em cada categoria de impacto por um terceiro gráfico de barras com os valores das parcelas de contribuição dos materiais (pedra britada, areia, cimento, aço e madeira para formas) da classe de referência C25 para uma verificação da importância de cada material nos resultados da estrutura.

Categorias de Impacto potencial e consumo recursos naturais x Classes de Resistência Estrutura	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Potencial de Acidificação [Kg SO ₂ -Equiv.]	4,65E-01	4,72E-01	4,49E-01	4,37E-01	4,39E-01	4,42E-01
Ecotoxicidade crônica do solo [m ³ solo]	1,77E+01	1,82E+01	1,73E+01	1,73E+01	1,75E+01	1,77E+01
Ecotoxicidade aguda da água [m ³ água]	8,41E+02	8,57E+2	8,16E+2	7,88E+2	7,91E+2	7,97E+2
EDIP 1997, Ecotoxicidade crônica da água [m ³ água]	8,43E+03	8,58E+3	8,19E+3	7,90E+3	7,93E+3	8,00E+3
EDIP 1997, Potencial de aquecimento global (GWP 100 anos) [kg CO ₂ -Equiv]	1,17E+02	1,20E+02	1,14E+02	1,11E+02	1,12E+02	1,14E+02
EDIP 1997, Toxicidade humana ao ar [m ³ ar]	2,00E+07	2,00E+07	1,94E+07	1,94E+07	1,96E+07	1,98E+07
EDIP 1997, Toxicidade humana ao solo [m ³ solo]	1,18E+01	1,22E+01	1,15E+01	1,10E+01	1,11E+01	1,13E+01
EDIP 1997, Toxicidade humana a água [m ³ água]	6,41E+02	6,57E+02	6,26E+2	6,23E+02	6,30E+02	6,39E+02
EDIP 1997, Eutrofização [kg NO ₃ -Equiv.]	7,11E-01	7,22E-01	6,69E-01	6,64E-01	6,62E-01	6,67E-01
EDIP 1997, Potencial de destruição do ozônio [Kg R11-Equiv.]	2,35E-07	2,29E-07	2,21E-07	2,39E-07	2,41E-07	2,40E-07
EDIP 1997, Formação de ozônio fotoquímico (alto NOx)[kg Etano-Equiv.]	4,11E-02	4,13E-02	3,95E-02	3,90E-02	3,92E-02	3,92E-02
EDIP 1997, Formação de ozônio fotoquímico (baixo NOx) [Kg Eteno-Equiv.]	5,00E-02	4,15E-02	3,97E-02	3,94E-02	3,96E-02	3,97E-02
Recursos Energéticos não renováveis (kwh)(kWH)	4,25E+01	4,15E+3	3,82E+2	3,70E+2	3,70E+2	3,70E+2
Recursos Energéticos renováveis (kwh)	3,14E+1	3,18E+01	2,86E+01	2,85E+01	2,87E+01	2,89E+01
Recursos materiais não renováveis (Kg)(Kg)	5,78E+02	5,71E+02	4,82E+02	4,60E+02	4,58E+02	4,62E+02
Recursos materiais renováveis (kg)	1,08E+04	1,19E+4	1,00E+4	9,71E+3	1,02E+4	1,05E+4
Geração de resíduos(kg)	6,55E+01	6,59E+1	6,34E+1	6,52E+1	6,62E+1	6,73E+1

Quadro 8 – Categoria de impacto potencial e consumo recursos naturais x classe de resistência da estrutura para 1m² da unidade funcional – EDIP 1997

7.1) Acidificação: refere-se às substâncias ácidas, como a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre (SO_x) para a atmosfera, e depositados na água e no solo, resultando no aumento da acidez pela redução do pH (um dos efeitos decorrentes são as chuvas ácidas).

As fontes artificiais mais importantes de acidificação são os processos de combustão para a produção de eletricidade e aquecimento, e as relativas ao transporte.

O potencial de acidificação é expresso em uma quantidade equivalente de uma substância de referência, o dióxido de enxofre (SO₂). A acidificação é um impacto onde a maioria dos efeitos no meio ambiente ocorre em escala regional, (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Na figura 15, podem ser verificados os potenciais de acidificação para cada classe de resistência da estrutura.

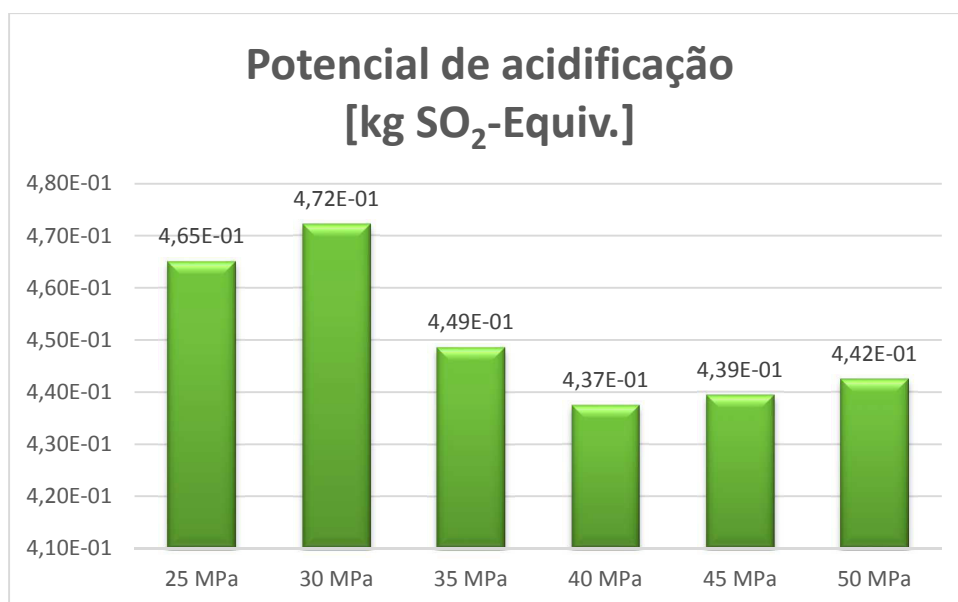


Figura 15 – Categoria de impacto de potencial de acidificação, EDIP 1997.

Da análise dos resultados verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C40. A manutenção da classe de resistência sem a redução das dimensões das peças estruturais, como executado entre as classes C25 e C30, resultou em valores desfavoráveis.

Com a redução dos elementos estruturais proporcionado pelo aumento das classes de resistência (de C25 a C45), ocorreu uma redução nas massas de concreto e consequentemente do cimento por m^2 (de $71,3\text{kg}/m^2$ a $68,04\text{ kg}/m^2$) e formas de madeira consumidas, até uma estabilização nas classes C45 e C50, onde não foi mais possível a redução das peças ocorreu ainda um aumento no consumo de cimento, seguido de uma redução irrisória no consumo de aço por m^2 estrutural (de $21,1\text{ kg}/m^2$ para $21,0\text{ kg}/m^2$).

A figura 16 mostra as principais contribuições dos processos de produção para a classe C25 e parcela significativa é proveniente do processo de produção dos materiais da estrutura de concreto armado.

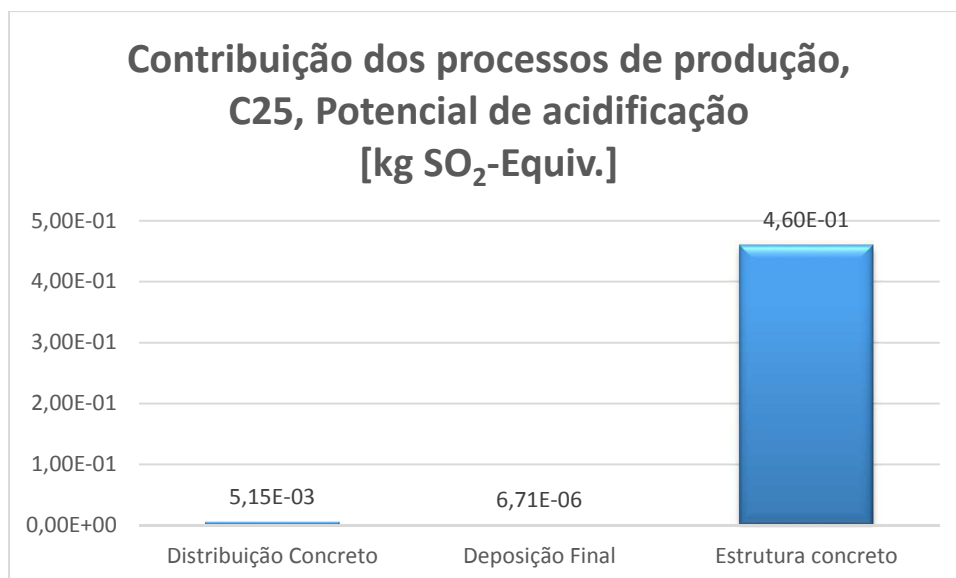


Figura 16 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de acidificação potencial, EDIP 1997

O processo da estrutura de concreto relativa ao consumo de formas de madeira, ilustrado para a classe C25 na figura 17, é o maior contribuinte na parcela de impacto nesse processo produtivo. Isto é explicado pelas grandes distâncias da origem da madeira aos centros consumidores e o impacto relativo ao seu transporte. As seguintes parcelas importantes de contribuição são devidas à produção de cimento (pouco menos da metade da madeira) seguida pela do aço.

Uma redução na área de formas por m² da C25 para a C45, onde ocorreu o melhor resultado, de aproximadamente 7% associado à redução do consumo de cimento por m² de menos de 5% entre as mesmas classes de resistência, resultou em um ganho de quase 15% na redução deste potencial de impacto.

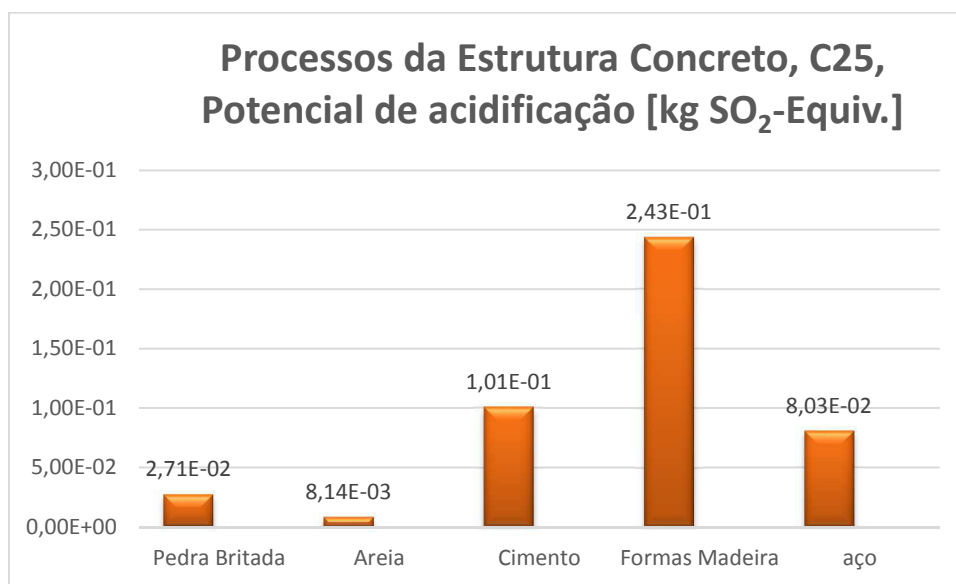


Figura 17 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto de acidificação potencial, EDIP 1997

7.2) Ecotoxicidade: trata-se da ação prejudicial, algumas vezes irreversível, de substâncias tóxicas à fauna e flora pelas atividades antrópicas. Tais efeitos podem afetar os organismos vivos, a função e a estrutura do ecossistema. Se as concentrações de substâncias perigosas para o ambiente causadas pelas emissões são suficientemente altas, os efeitos tóxicos podem ocorrer assim que as substâncias são liberadas. Esta forma de efeito tóxico é chamada de ecotoxicidade aguda e, muitas vezes, resulta na morte dos organismos expostos (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Ecotoxicidade crônica é geralmente causada por substâncias que perduram por um longo tempo após a sua emissão (substâncias persistentes). O resultado de um impacto ecotóxico crônico pode, por exemplo, reduzir a capacidade de reprodução, o que significa que as hipóteses de sobrevivência de espécies a longo prazo são diminuídas. A ecotoxicidade é um impacto que afeta predominantemente o meio ambiente em escalas locais e regionais. Pode ser um impacto global para algumas substâncias tóxicas de muito baixa biodegradabilidade com uma forte tendência a se acumular nos organismos vivos (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

A lista de substâncias classificadas como contribuintes para a ecotoxicidade é muito mais abrangente do que a lista correspondente dos outros impactos ambientais e inclui muitos tipos diferentes de substâncias com diferentes características químicas além de todas as substâncias do inventário que podem ter um efeito direto na saúde dos ecossistemas (ibid.).

Existem várias propostas de como a ecotoxicidade pode ser tratada da ACV, mas na visão dos autores da metodologia EDIP, sua base científica é muito fraca, ou suas demandas sobre os dados são demasiado elevadas para torná-los operacionais e serem utilizáveis na prática. Foi então necessário para esse fim, na metodologia EDIP, o desenvolvimento de um método para cálculo das emissões potenciais de ecotoxicidade. O método EDIP é inspirado

por orientações técnicas da Comissão da União Europeia para a avaliação de risco dos produtos químicos no ambiente.

O potencial da ecotoxicidade em um compartimento do meio ambiente, da água, do solo e uma planta de tratamento de esgoto, é determinado como sendo o produto da quantidade de substância emitida e multiplicada por um fator de equivalência para a emissão em relação ao compartimento em questão. O potencial ecotoxicidade é medido em metros cúbicos de compartimento. Ele corresponde ao volume do compartimento a que as emissões devam ser diluídas de modo a obtenção de uma concentração de substância tão baixa que não ocorram efeitos ecotóxicos que seriam esperados a partir da emissão, (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Na figura 18, podem ser verificados os potenciais de ecotoxicidade crônica do solo, para cada classe de resistência da estrutura.

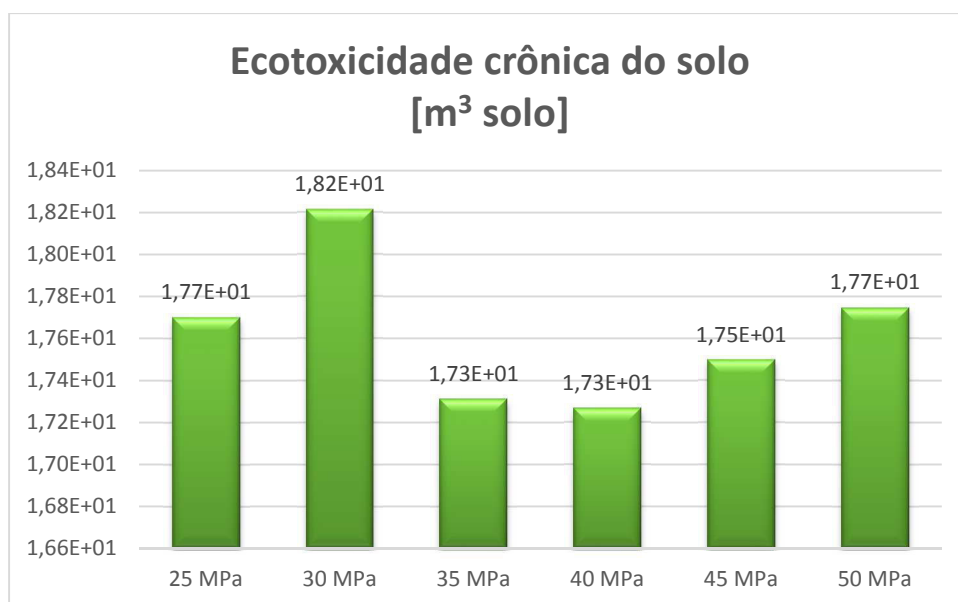


Figura 18 – Categoria de impacto de potencial de ecotoxicidade crônica do solo, EDIP 1997

Da análise dos resultados verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C40. A manutenção da classe de resistência sem a redução das dimensões das peças estruturais, como executado entre as classes C25 e C30, resultou em um valor desfavorável da C30. No caso quando da manutenção das dimensões das peças estruturais entre as classes C45 e C50 a diferença foi em um valor maior na C50. Decorrente da diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C45 verificou-se uma redução de aproximadamente 2,3% do potencial de impacto.

Observando-se a figura 19, as parcelas de contribuição nesta categoria de impacto, a classe C25, a maior parcela de contribuição é referente ao processo da estrutura de concreto armado.

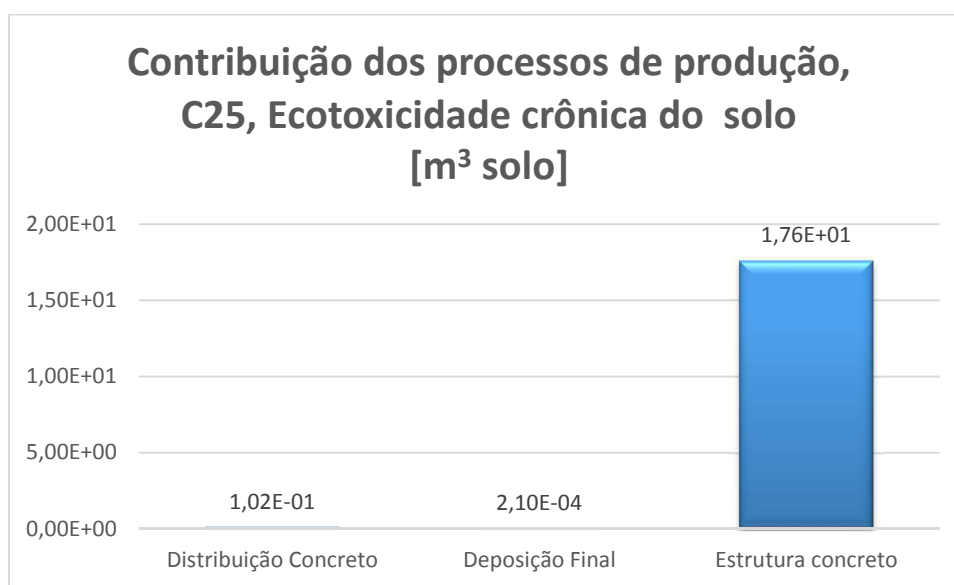


Figura 19 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de potencial de ecotoxicidade crônica do solo, EDIP 1997

Na figura 20 pode-se observar as maiores contribuições dos impactos na estrutura de concreto relativos ao cimento (aproximadamente 46%) e do aço (aproximadamente 39%) caracterizando a emissão significativa de componentes tóxicos persistentes desses

componentes prejudiciais ao solo, seguidas pela contribuição da madeira das formas (aproximadamente 14,4%).

Com a redução dos elementos estruturais, proporcionado pelo aumento das classes de resistência de C25 e considerando até C40, ocorreu uma redução nas massas de concreto e do cimento/m² (de 71,3kg/m² a 66,13kg/m²) acompanhada, por outro lado, do aumento no consumo de aço (de 20kg/m² para 20,9kg/m² respectivamente).

Da C45 para a C50, onde não foi mais possibilitada a redução das dimensões das peças estruturais, fica evidenciada a contribuição do cimento dada a praticamente manutenção da taxa de armadura por m² (21,1kg/m² e 21kg/m² respectivamente²) com o aumento da taxa de cimento por m² entre as classes (de 68,04kg/m² para 70,73kg/m²), seguida pelo aumento neste potencial de impacto.

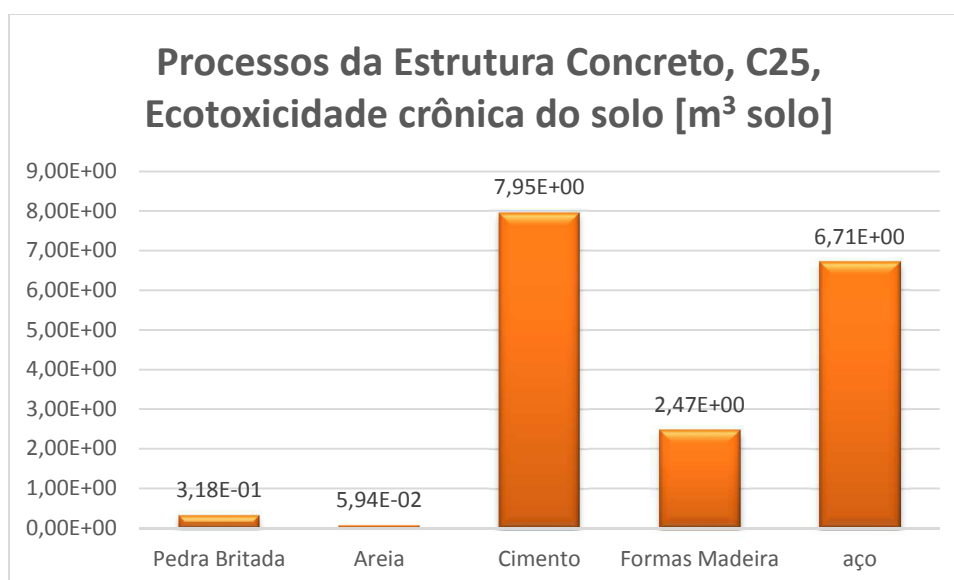


Figura 20 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25 Categoria de Impacto de potencial de ecotoxicidade crônica do solo, EDIP 1997

Na figura 21, podem ser verificados os potenciais de ecotoxicidade aguda da água, para cada classe de resistência da estrutura.

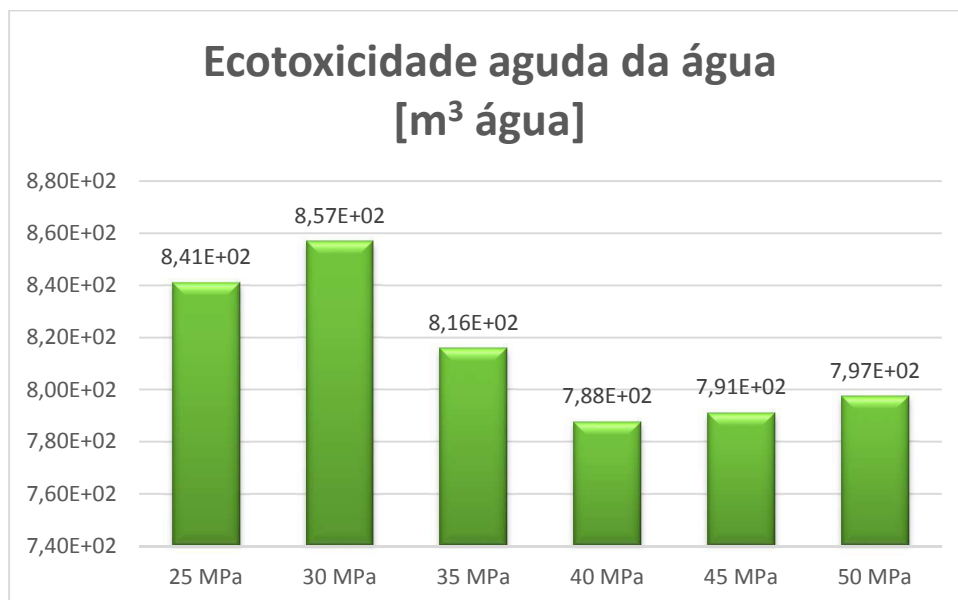


Figura 21 – Categoria de impacto de potencial de ecotoxicidade aguda da água, EDIP 1997

Da análise dos resultados verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado nesta categoria de impacto foi a C40, seguida da C45 e da C50.

A manutenção da classe de resistência sem a redução das dimensões das peças estruturais, como executado entre as classes C25 e C30, resultou em um valor desfavorável da C30. No caso da manutenção entre as classes C45 e C50 a diferença foi desfavorável para a classe C50. Devido a diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C45 verificou-se uma redução de aproximadamente 6,3% do potencial de impacto.

Observando-se a figura 22 a seguir, das parcelas de contribuição nesta categoria de impacto, o processo relevante foi da estrutura de concreto armado.

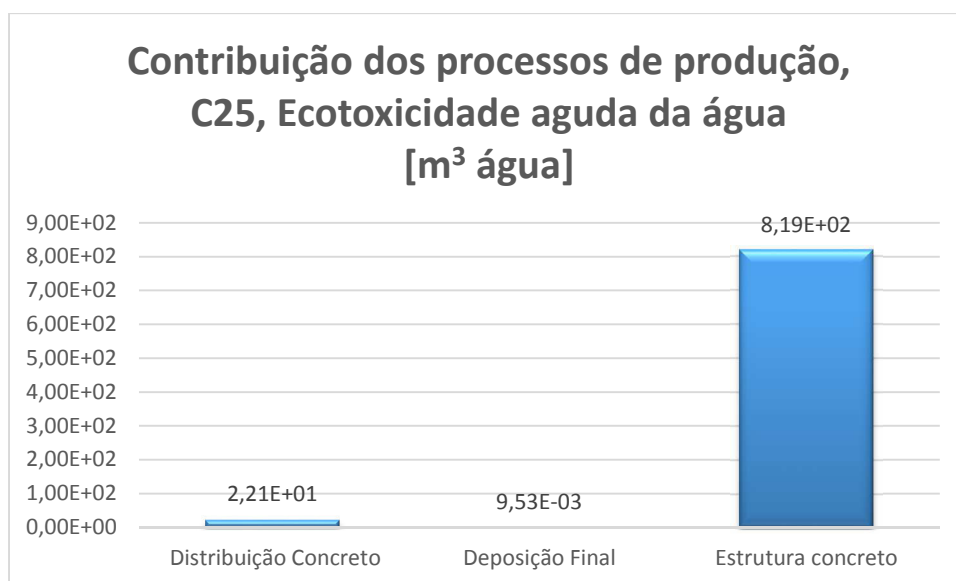


Figura 22 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de potencial de ecotoxicidade aguda da água, EDIP 1997

Na figura 23, pode-se observar que as maiores contribuições, no processo da estrutura de concreto armado, são relativos à extração e transporte da madeira. A maior responsabilidade dos impactos relativos ao processo de produção da madeira são do transporte da mesma, seguido do cimento e do aço.

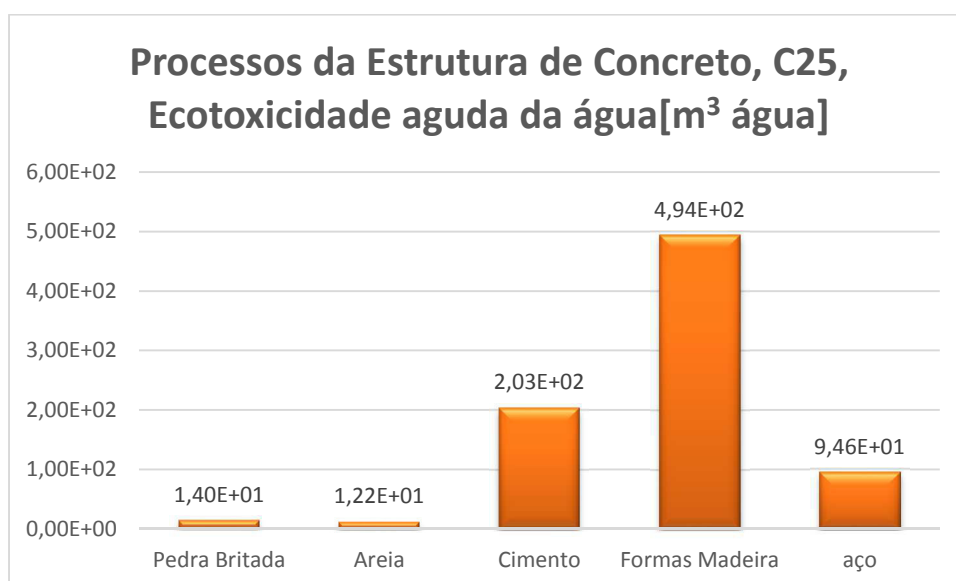


Figura 23 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto de potencial de ecotoxicidade aguda da água, EDIP 1997

Na figura 24, podem ser verificados os potenciais de ecotoxicidade crônica da água, para cada classe de resistência da estrutura.

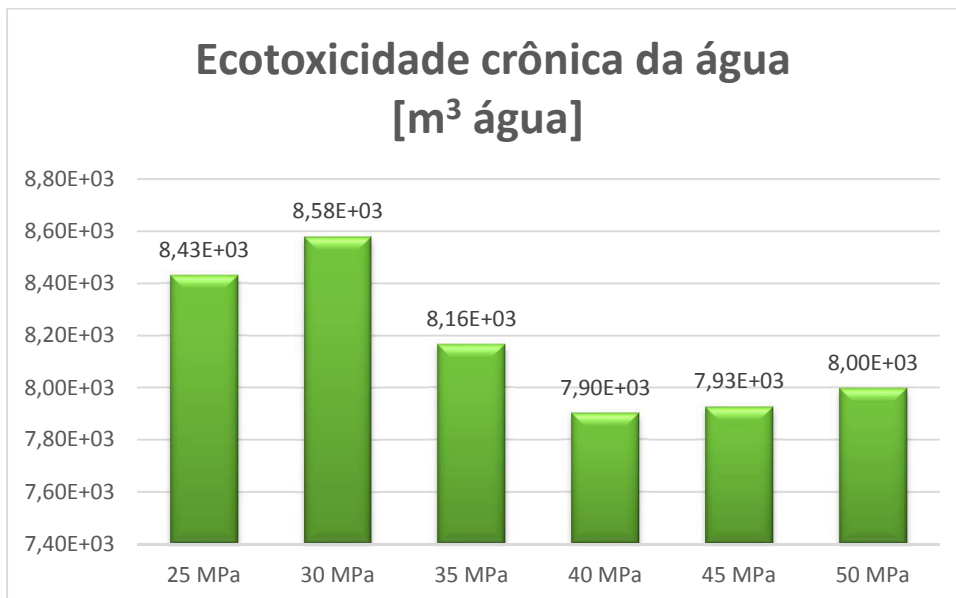


Figura 24 – Categoria de impacto de potencial de ecotoxicidade crônica da água, EDIP 1997

Da análise dos resultados verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C40 mais uma vez, seguida por uma pequena diferença da C45 e C50.

A manutenção da classe de resistência sem a redução das dimensões das peças estruturais, como executado entre as classes C25 e C30, resultou em um valor desfavorável para a classe C30. No caso da manutenção das dimensões entre as classes C45 e C50 resultou em um valor maior da C50. Decorrente da diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C40 verificou-se uma redução de aproximadamente 6,3% do potencial de impacto.

Observando-se a figura 25, relativa às parcelas de contribuição dos processos nesta categoria de impacto, para a classe C25, a parcela referente ao processo de produção da estrutura de concreto armado é a relevante, com um valor bem maior do que as demais.

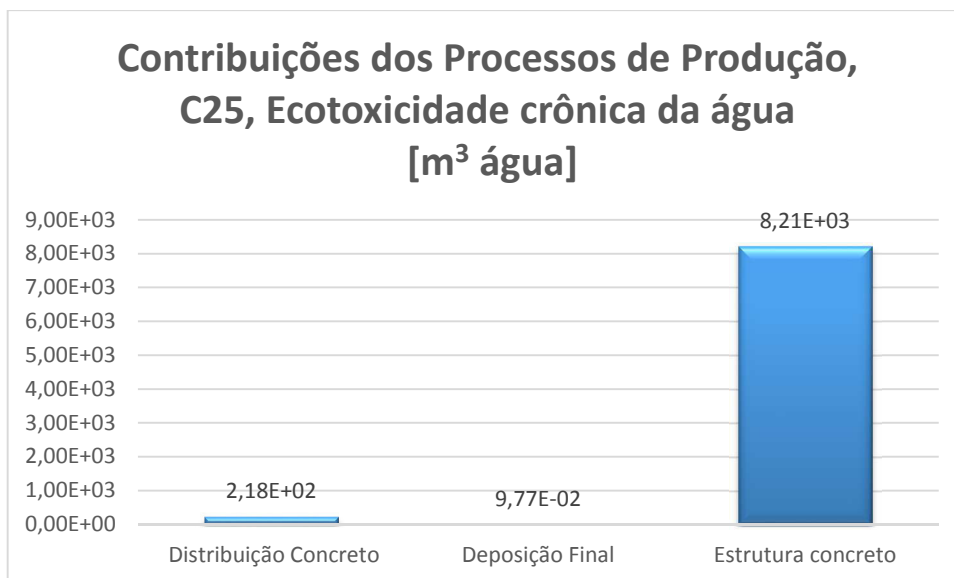


Figura 25 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de potencial de ecotoxicidade crônica da água, EDIP 1997

Na figura 26 pode-se observar que as maiores contribuições na estrutura de concreto armado são relativas à extração da madeira e seu transporte. A maior responsabilidade dos impactos relativos à produção da madeira são do transporte da mesma. Os processos significativos seguintes são relativos à produção do cimento e depois do aço.

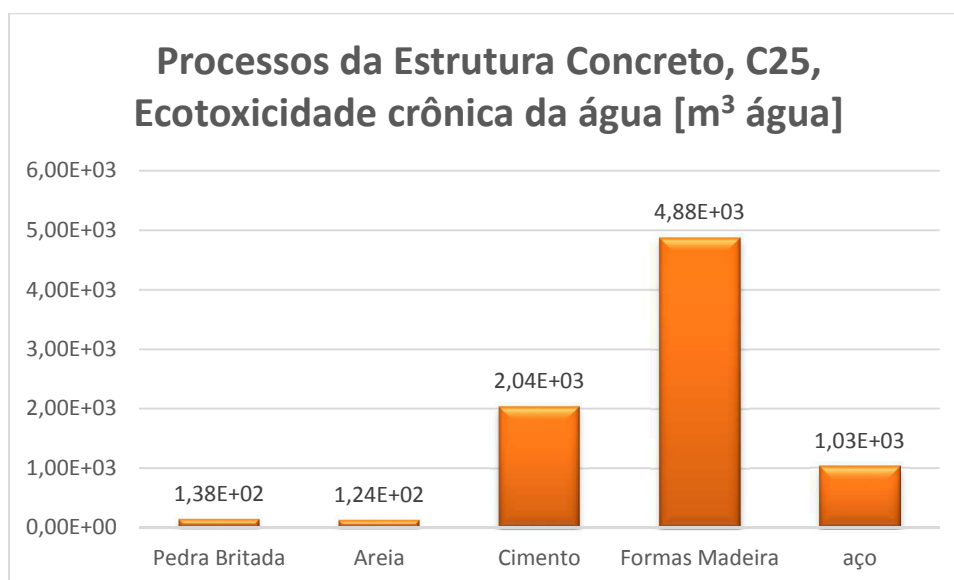


Figura 26 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25, EDIP 1997
Categoria de Impacto de potencial de ecotoxicidade crônica da água

7.3) Aquecimento global: está relacionado à emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂ e o metano (CH₄), resultando no aumento da temperatura terrestre na baixa atmosfera. A contribuição humana mais importante para o impacto do aquecimento global é atribuído à queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. O aquecimento global é um impacto que afeta o meio ambiente em escala global, (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Os relatórios emitidos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) compreendem a base da ferramenta de avaliação do método EDIP pelo aquecimento global. O IPCC apresenta os potenciais de aquecimento global (global warming potentials - GWPs), os quais expressam individualmente para cada gás do efeito estufa, o potencial contribuição para o aquecimento global, a partir de uma determinada quantidade do gás, em relação à contribuição de uma quantidade correspondente de CO₂, (ibid.).

Na figura 27 são apresentados os potenciais de aquecimento global obtidos, para cada classe de resistência da estrutura.

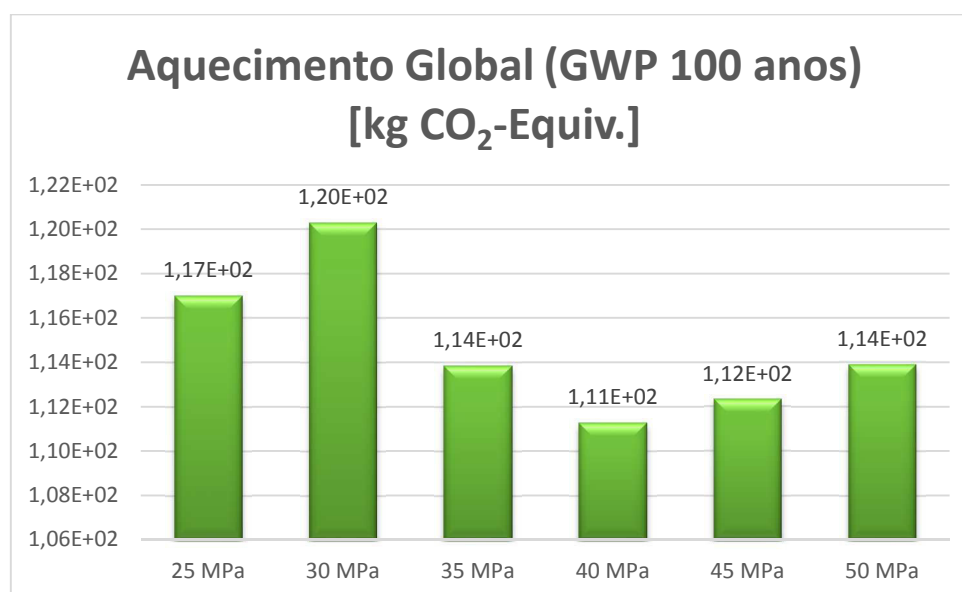


Figura 27 – Categoria de impacto de potencial de aquecimento global, EDIP 1997

Da análise dos resultados desta categoria de potencial de impacto, verifica-se que a classe de resistência que apresentou resultado benéfico mais expressivo foi a C40. Na categoria de impacto de aquecimento global, para a unidade funcional analisada, verifica-se que a redução nas dimensões das peças estruturais foi benéfica em todas as classes de resistência em relação à classe C25.

Quando não foi efetuada a redução, como entre as classes C25 e C30 e entre as classes C45 e C50, ocorreu um aumento dos potenciais de impacto nas classes maiores entre as comparadas. É importante observar que nesta categoria de impacto foi considerada a absorção de CO₂ pela estrutura de concreto com o passar do tempo.

Decorrente da diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C40 verificou-se uma redução de aproximadamente 5,1% do potencial de impacto.

Observando-se a figura 28, relativa às parcelas de contribuição nesta categoria de impacto para a classe C25 de referência, a parcela significativa é a do processo de produção da estrutura de concreto armado.

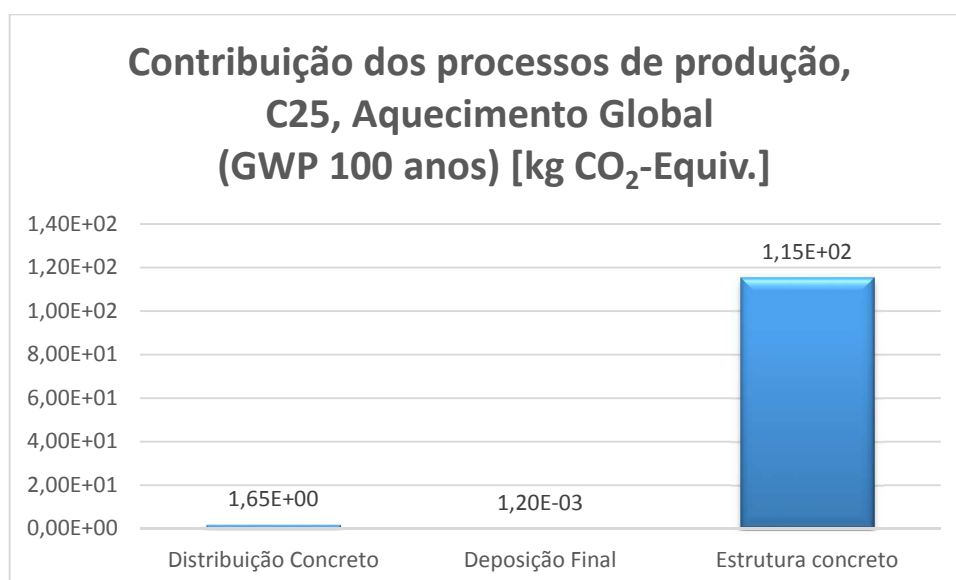


Figura 28 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de potencial de aquecimento global, EDIP 1997

Na figura 29 pode-se observar as maiores contribuições dos impactos na estrutura de concreto relativos ao cimento (aproximadamente 39,5%) caracterizado por uma emissão significativa de poluentes que contribuem para o aquecimento global devido ao seu processo produtivo por meio da queima de combustíveis. Este é seguido pela contribuição da madeira das formas (aproximadamente 32,2%), devido à queima de combustíveis decorrentes do transporte. O aço teve relevante importância também devido às emissões decorrentes de seu processo de fabricação (aproximadamente 23,4%).

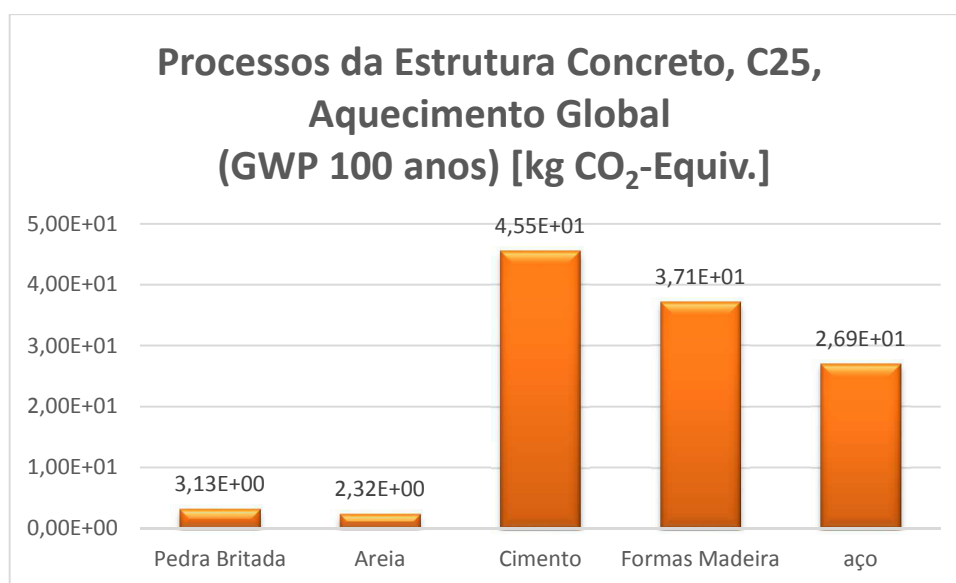


Figura 29 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto de potencial aquecimento global

Com a redução dos elementos estruturais proporcionado pelo aumento das classes de resistência de C25 e considerando até classe C40, ocorreu uma redução nas massas de concreto e conseqüentemente do cimento/m² (de 71,3kg/m² a 66,13kg/m²) acompanhada, por outro lado, do aumento no consumo de aço (de 20kg/m² para 20,9kg/m², respectivamente). Tal comportamento vem a confirmar a relevância observada neste quesito nas emissões mais significativas devido ao processo de fabricação do cimento (destaca-se ainda que o cimento utilizado na avaliação foi o CIII, com um menor teor de clínquer).

7.4) Toxicidade humana: Substâncias químicas emitidas como consequência das atividades humanas podem contribuir para a toxicidade humana pela exposição ao ambiente. Este é o caso das substâncias que são venenosas e se as suas características em combinação com a sua forma de emissão resultam em exposição ao ser humano. Os caminhos mais importantes de exposição são por meio do ar inalado ou através de outros materiais ingeridos oralmente, como por exemplo, os alimentos.

A toxicidade é um impacto que predominantemente afeta os humanos no ambiente nas escalas locais e regionais. Para um número limitado de substâncias que são fragmentadas com grande dificuldade, facilmente transportadas e venenosas, a toxicidade pode ter um impacto global. Como a ecotoxicidade, a toxicidade pode ser atribuída a muitos tipos diferentes de impactos venenosos e uma lista de substâncias que podem causar a toxicidade humana ao ambiente pode incluir milhares de entradas. Assim como para a ecotoxicidade, foi necessário ser desenvolvido para o método EDIP um caminho para o cálculo da toxicidade potencial que pode ser calculada pela exposição dos humanos ao ambiente. O método de cálculo do potencial de toxicidade humana do EDIP também foi inspirado pelas orientações técnicas da Comissão da União Europeia para a avaliação de risco dos produtos químicos no ambiente (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

O potencial de toxicidade humana é expresso em m^3 do compartimento e corresponde ao volume do compartimento em que a emissão deva ser diluída para a sua concentração ser baixa o suficiente para não ocorrerem efeitos toxicológicos que possam ser esperados devido à exposição através de um dos compartimentos ar, água, solo ou pelo lençol freático (ibid.).

Na figura 30 são apresentados os potenciais de toxicidade humana ao ar obtidos, para cada classe de resistência da estrutura.

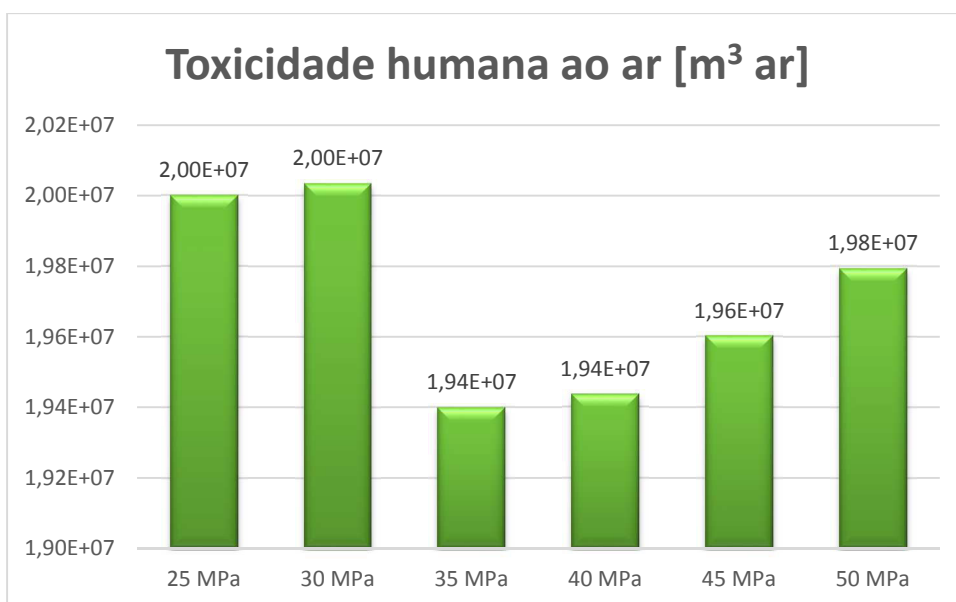


Figura 30 – Categoria de impacto de potencial de toxicidade humana ao ar, EDIP 1997

Da análise dos resultados desta categoria de potencial de impacto verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C35 seguida por uma pequena diferença da C40.

Na categoria de impacto de toxicidade humana ao ar, para a unidade funcional analisada, verifica-se que a redução das dimensões das peças estruturais também foi benéfica em todas as classes de resistência quando comparadas à classe C25.

Quando não foi efetuada a redução, como entre as classes C25 e C30 e entre as classes C45 e C50, ocorreu um aumento dos potenciais entre as classes comparadas na de maior classe (C30 e C50 respectivamente).

Decorrente que da diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C45 resultou em uma redução de aproximadamente 3,0% do potencial de impacto.

Observando-se a figura 31 das parcelas de contribuição nesta categoria de impacto para a classe C25, o processo de produção com valores significativos foi da estrutura de concreto armado.

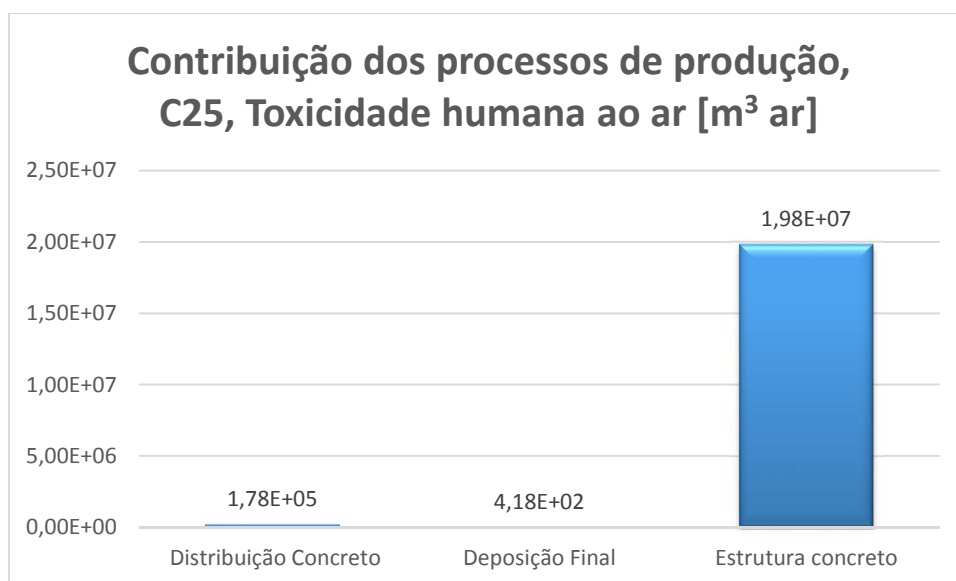


Figura 31 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de potencial de toxicidade humana ao ar, EDIP 1997

Na figura 32 pode-se observar que as maiores contribuições dos impactos na estrutura de concreto são relativas ao aço (aproximadamente 40%), seguido pela madeira das formas (aproximadamente 31%) e o cimento (aproximadamente 26%).

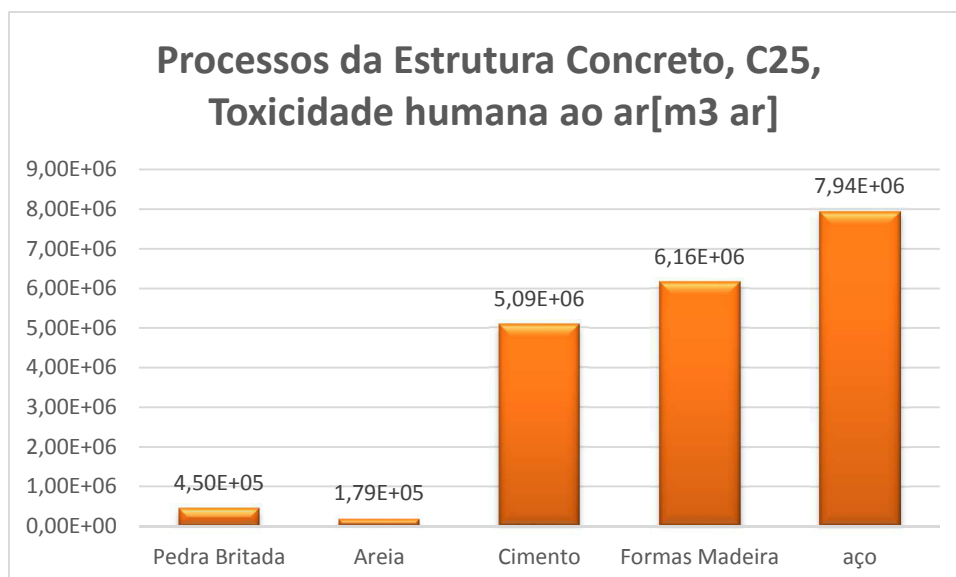


Figura 32 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto de potencial de toxicidade humana ao ar

Com a redução dos elementos estruturais, proporcionado pelo aumento das classes de resistência de C25 e considerando até a classe que apresentou o melhor resultado, a C35, ocorreu uma redução nas massas de concreto e conseqüentemente do cimento/m² (de 71,3kg/m² a 70,3kg/m²). Esta foi acompanhada pela redução no processo de produção do aço (de 20kg/m² para 19,1kg/m² respectivamente) e da madeira para formas (de 2,2m² para 2,1 m²/m² respectivamente).

Os resultados foram condizentes, já que o processo de produção do aço é o mais importante e a classe C35 foi a que obteve o menor consumo de aço/m², conforme descrito na figura 19.

Ainda verifica-se que a redução dos consumos de cimento e madeira para formas, em conjunto, relevantes no balanço final reduzindo os impactos graças à redução das seções e consumos por m², como observado para a classe C40.

Na figura 33, são apresentados os potenciais de toxicidade humana ao solo, obtidos para cada classe de resistência da estrutura.

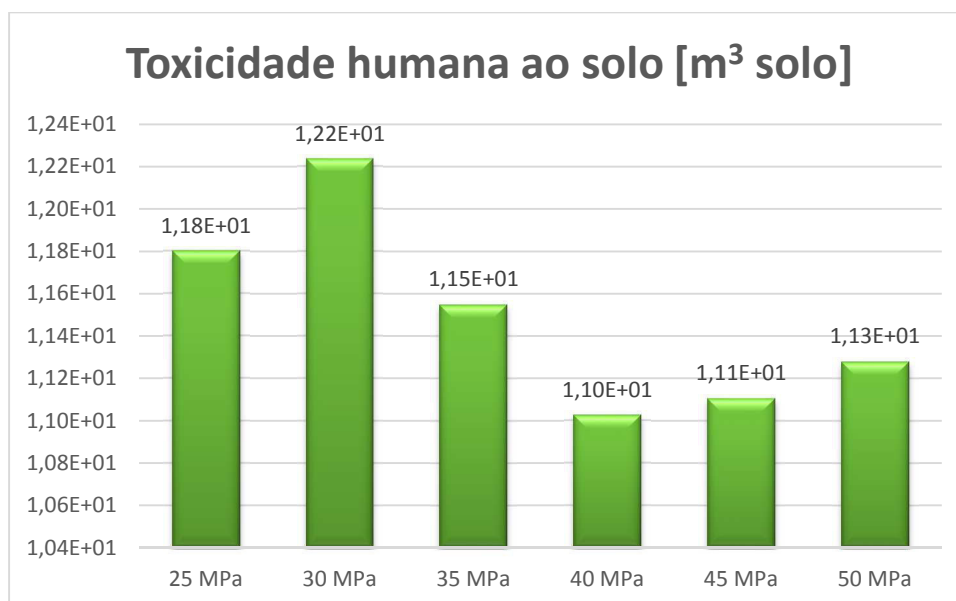


Figura 33 – Categoria de impacto de potencial de toxicidade humana ao solo, EDIP 1997

Da verificação dos resultados desta categoria de potencial de impacto observa-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C40. Decorrente da diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C40, verificou-se uma redução de aproximadamente 6,8% do potencial de impacto.

Mais uma vez, quando não foi efetuada a redução, como entre as classes C25 e C30 e entre as classes C45 e C50, ocorreu um aumento dos valores deste potencial de impacto para a estrutura de maior classe de resistência.

Observando-se a figura 34 das parcelas de contribuição nesta categoria de impacto para a classe C25, a maior contribuição é referente ao processo de produção da estrutura de concreto armado.

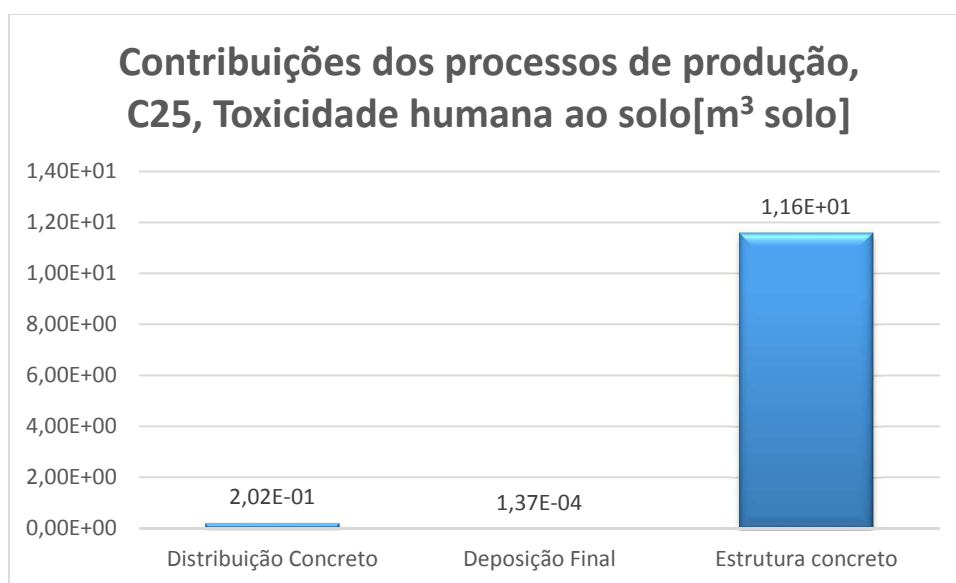


Figura 34 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25, EDIP 1997
Categoria de impacto de potencial de toxicidade humana ao solo

Na figura 35 é verificado que a madeira para formas é a contribuição de maior relevância (aproximadamente 49%) e seus impactos são basicamente relativos ao seu transporte por longas distâncias, seguido pelos potenciais de impacto do cimento (aproximadamente 42%) e depois pelo aço (aproximadamente 9%).

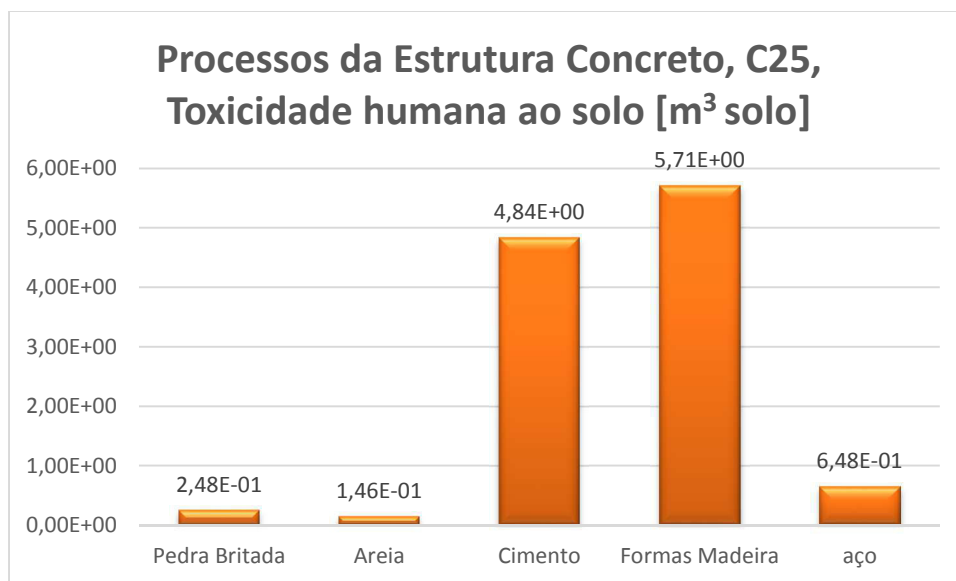


Figura 35 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto de potencial de toxicidade humana ao solo, EDIP 1997

A redução das peças da estrutura de concreto armado da classe C25 até a C40, é acompanhada da redução da área madeira para formas (de 2,2m² para 2,05 m²/m² respectivamente) e da do cimento/m² (de 71,3kg/m² a 66,13kg/m²). Os dois processos mais relevantes do total. Tal procedimento foi acompanhado ainda, por um ligeiro aumento no processo de produção do aço da classe C25 para a C40, de 20kg/m² para 20,9kg/m² respectivamente. Devido à menor contribuição do processo de fabricação do aço no processo de fabricação da estrutura, este foi compensado pelos processos do cimento e forma de madeira anteriormente mencionados.

Na figura 36 são apresentados os potenciais de toxicidade humana na água obtidos, para cada classe de resistência da estrutura.

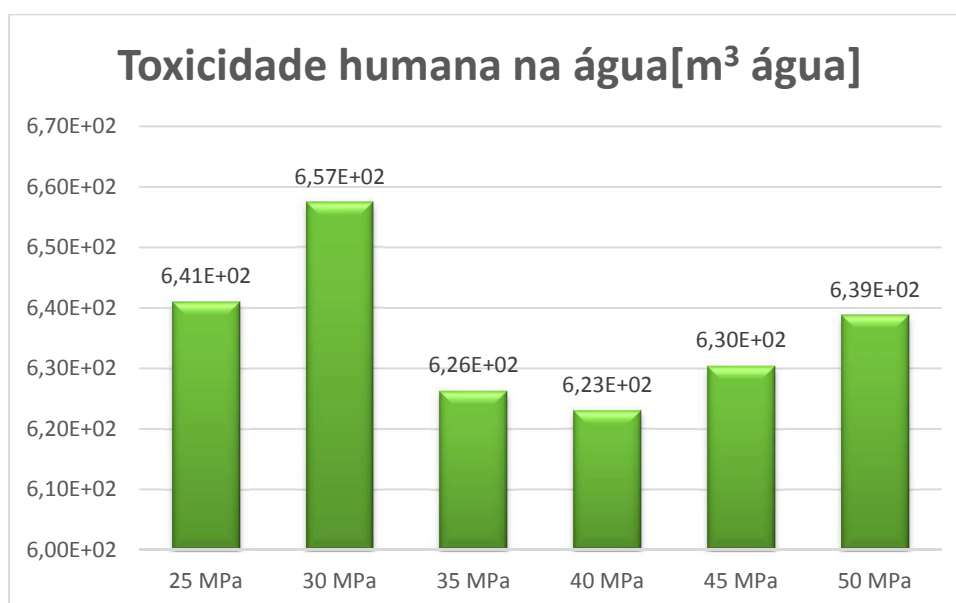


Figura 36 – Categoria de impacto de potencial de toxicidade humana na água, EDIP 1997

Novamente por meio do estudo dos resultados verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C40. Decorrente da diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C40, verificou-se uma redução de aproximadamente 2,8% do potencial de impacto.

Em relação à classe C25, as reduções nas peças estruturais se mostraram benéficas, já que todas as categorias onde foi efetuado o procedimento, apresentaram resultados favoráveis. Mais uma vez, quando não foi efetuada a redução, como entre as classes C25 e C30 e entre as classes C45 e C50, ocorreu um aumento dos potenciais para a estrutura de maior classe de resistência.

Observando-se a figura 37 das parcelas de contribuição nesta categoria de impacto para a classe C25, o processo da estrutura de concreto armado, é a parcela relevante do total.

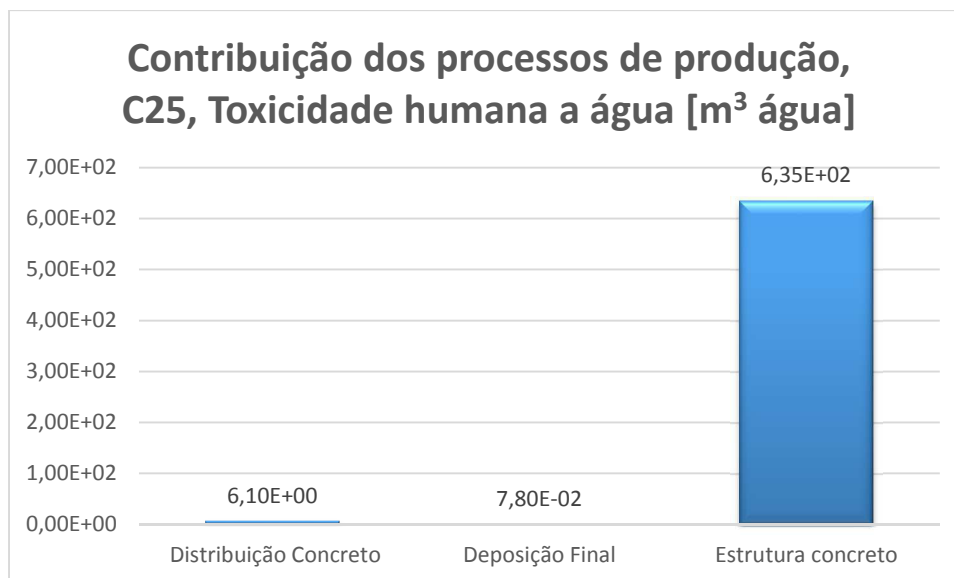


Figura 37 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de potencial de toxicidade humana da água, EDIP 1997

Na figura 38 pode-se observar que as maiores contribuições dos impactos do processo de produção da estrutura de concreto armado são relativas ao cimento (aproximadamente 41,6%), seguido pela aço (aproximadamente 35,5%) e a madeira para formas (aproximadamente 21,5%).

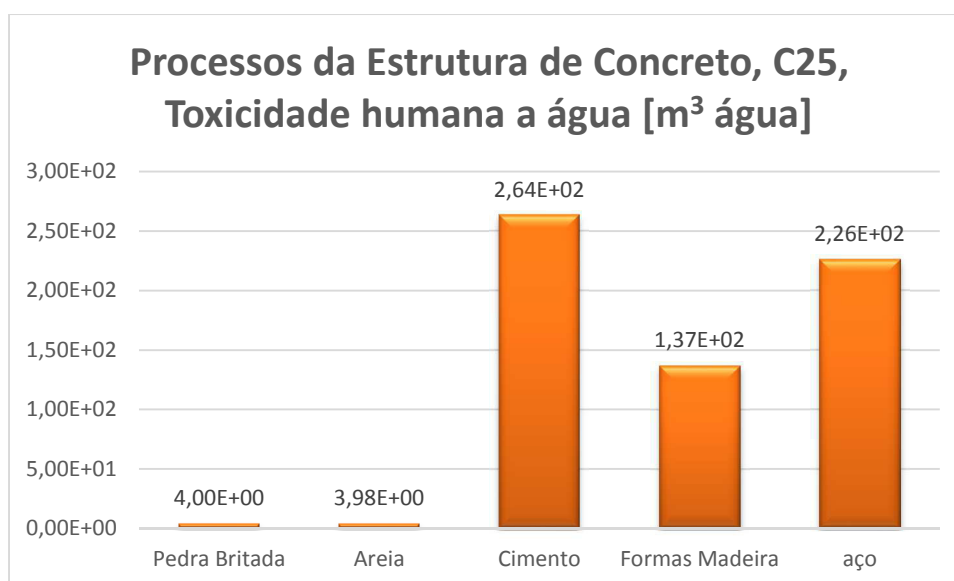


Figura 38 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto de potencial de toxicidade humana da água, EDIP 1997

O menor consumo de cimento/m² mostrou-se decisivo novamente, sendo o menor para a classe C40. A classe C35 apresentou a menor taxa de aço/m² (que é o 2º processo de contribuição mais relevante) e resultou no balanço final na 2ª colocação desta classe de resistência.

7.5) Eutrofização: trata-se do enriquecimento abrupto e excessivo de nutrientes na água ou no solo, especialmente a partir de substâncias à base de nitrogênio ou fósforo. No solo e na água, a eutrofização pode alterar a biodiversidade nos ecossistemas. No método EDIP 97 foi assumida a quantidade equivalente (NO₃-Equiv) de referência das substâncias para a quantificação dos resultados. O enriquecimento de nutrientes é um impacto que afeta o meio ambiente em ambas as escalas regionais e locais, (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Da análise dos resultados deste potencial de impacto, ilustrados nos gráficos da figura 39, verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C45 seguida pela C40.

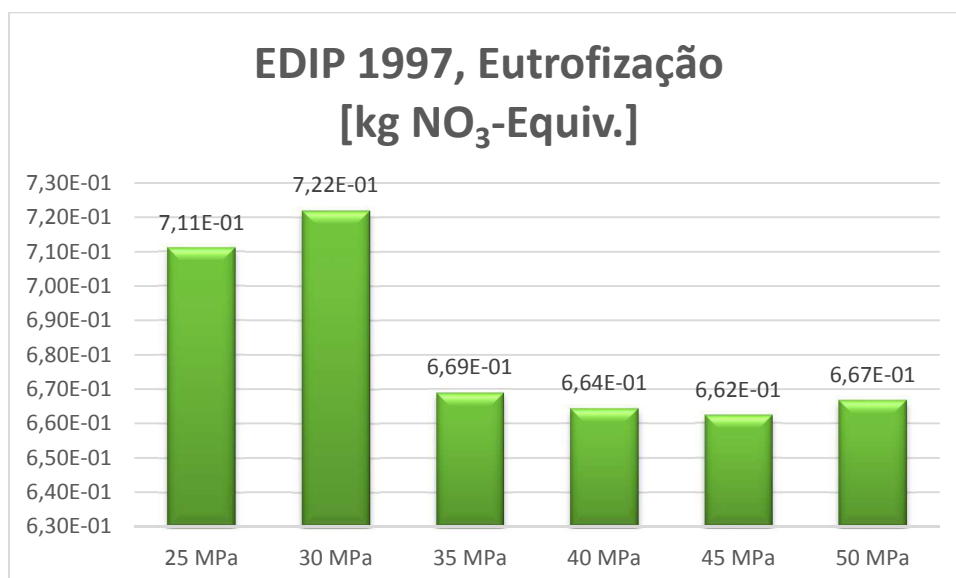


Figura 39 – Categoria de potencial de impacto de eutrofização, EDIP 1997

Na categoria de impacto de potencial de eutrofização, para a unidade funcional analisada, verifica-se que a redução nas dimensões das peças estruturais também foi benéfica em todas as classes de resistência. As classes que sofreram a redução em relação à classe C25, todas apresentaram melhores resultados. Decorrente da diminuição das seções da estrutura C25 para a estrutura C45, verificou-se uma redução de aproximadamente 6,9% do potencial de impacto.

Quando não foi efetuada a redução, como entre as classes C25 e C30 e entre as classes C45 e C50, ocorreu um aumento dos potenciais entre as classes comparadas na de maior resistência.

Observando-se a figura 40 relativa às parcelas de contribuição nesta categoria de impacto para a classe C25, verifica-se que o processo relevante é o da produção da estrutura de concreto armado.

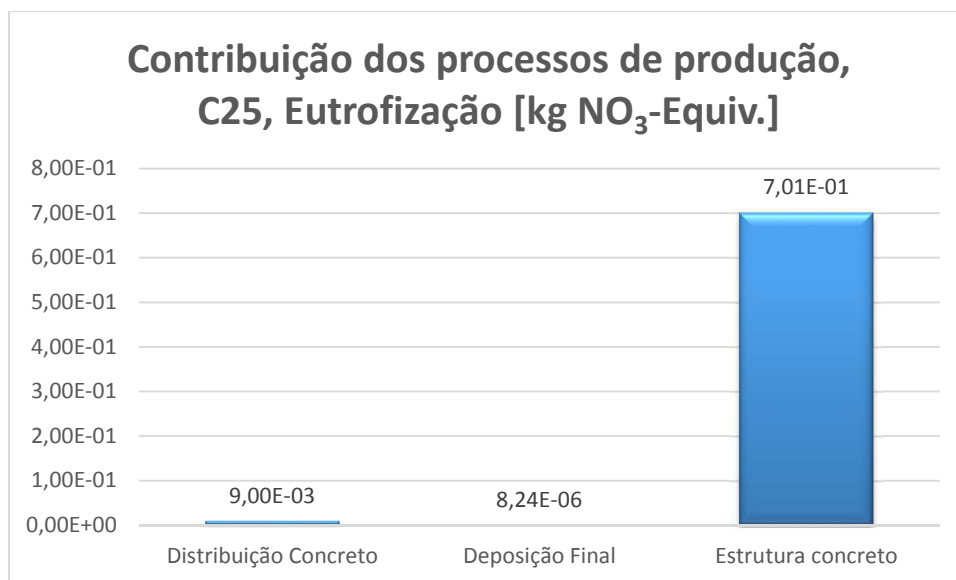


Figura 40 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto de eutrofização, EDIP 1997

Nesta categoria de impacto, potencial de eutrofização, verifica-se a importância dos impactos relativos aos processos de transporte. Este fato é comprovado pela parcela de contribuição da madeira para as formas no processo de produção da estrutura de concreto armado (aproximadamente 62,6%), que pode se observado na figura 41, basicamente relativo às grandes distâncias rodoviárias pela qual é transportada.

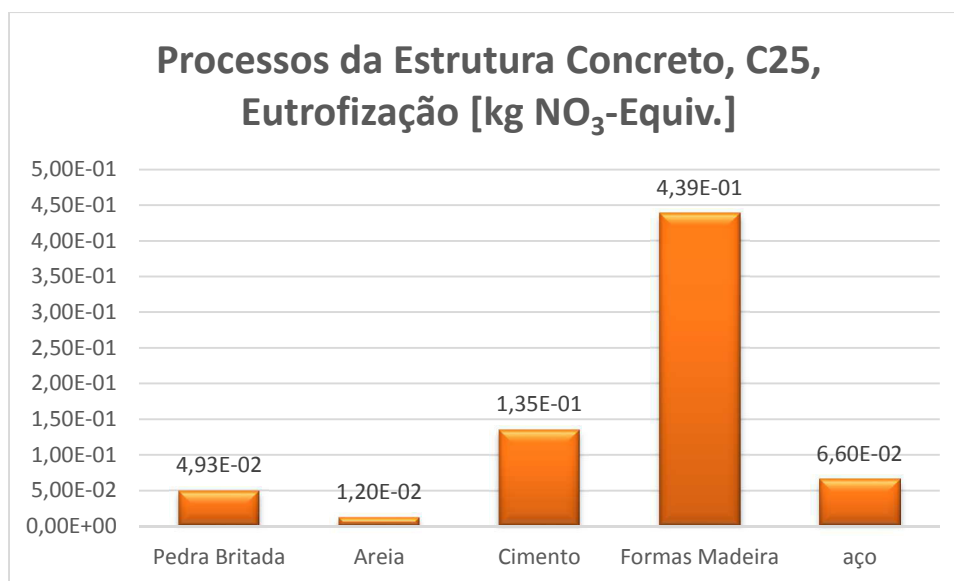


Figura 41 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto de potencial de eutrofização, EDIP 1997

Corroborando os resultados obtidos, a classe C45 é a que obteve a menor taxa de forma de madeira/m² (2,05m²/m²) e consumo de concreto/m² (16,8m³/m²), evidenciando a lógica e a validade dos resultados, devido a menor área a serem instaladas as formas.

7.6) Destruição do ozônio estratosférico: O ozônio estratosférico é destruído como consequência das emissões provocadas pelo homem de halocarbonos, ou seja, CFC, HCFC, halogênios e outros gases de longa duração, contendo cloro e bromo. O teor de ozônio da estratosfera, por conseguinte, está diminuindo, muitas vezes referido como o "buraco na

camada de ozônio" no Pólo Sul. Como consequência disso, a intensidade da radiação ultravioleta perigosa na superfície da Terra tem aumentado ao longo de partes dos hemisférios Norte e Sul. Isso pode ter consequências perigosas, sob a forma do aumento da frequência de câncer da pele em humanos e danos para as plantas que formam a base de todos os ecossistemas (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

A destruição do ozônio estratosférico é um impacto que afeta o meio ambiente em escala global. O cálculo do potencial de destruição de ozônio, para os gases individuais é expresso como uma emissão equivalente de uma substância de referência o CFC11 (CFCl_3) (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Na figura 42 são ilustrados os gráficos com os resultados deste potencial de impacto de destruição de ozônio estratosférico. Nesta categoria de potencial de impacto, a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C35.

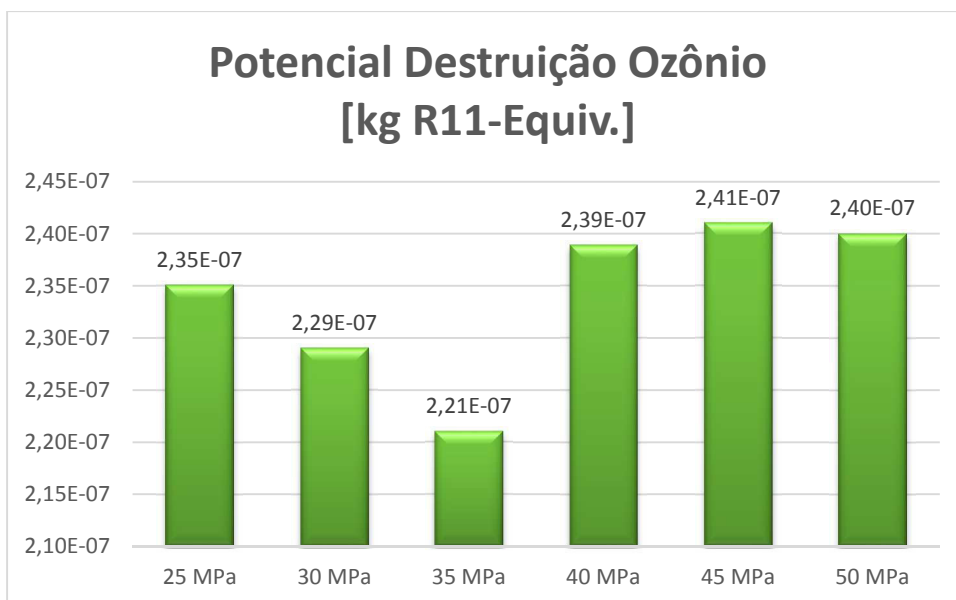


Figura 42 – Categoria de potencial de impacto destruição do ozônio estratosférico, EDIP 1997

Observando-se a figura 43, nesta categoria de impacto para a classe C25, verifica-se que o processo de produção da estrutura de concreto armado é a contribuição relevante entre os processos analisados.

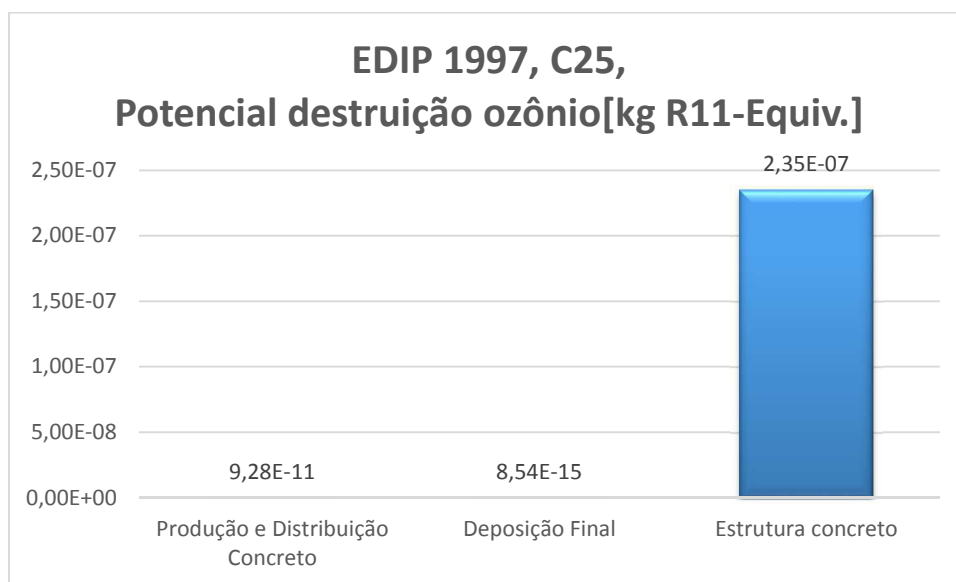


Figura 43 – Contribuições dos processos de produção para a classe C25
Categoria de impacto potencial de destruição do ozônio estratosférico, EDIP 1997

Da observação da figura 44, onde observam-se os gráficos com as parcelas de contribuição do potencial de impacto da estrutura de concreto armado, conclui-se que, pela base de dados do EDIP 1997 utilizada na ACV, quer a contribuição significativa é toda relativa ao processo de produção do aço. O resultado entre as classes de resistência é coerente já que, a classe C35 foi a que apresentou o menor consumo de aço por m² de construção, 19,1 kg/m², em comparação à todas as outras classes de resistência analisadas.

A classificação da categoria de impacto entre as classes apresentou o mesmo resultado lógico, sendo a classe C35 ter sido seguida da C30, C25, C40, C45 e C50, conforme ocorre o aumento na taxa de aço/m² ilustrado na figura 14 do capítulo 6.

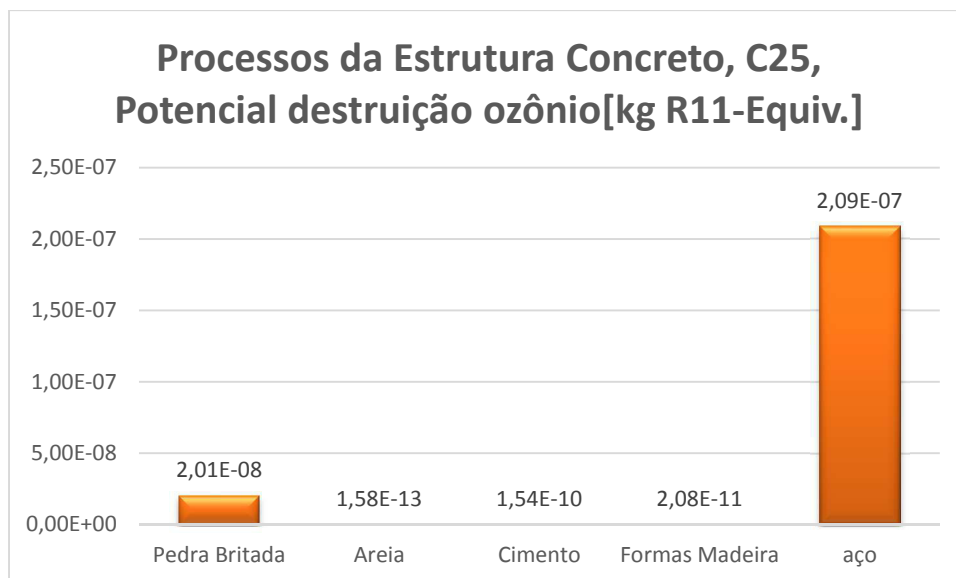


Figura 44 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de Impacto potencial de destruição do ozônio estratosférico, EDIP 1997

7.7) Formação de ozônio fotoquímico: Quando solventes e outros compostos orgânicos voláteis são liberados para a atmosfera, são muitas vezes degradados dentro de poucos dias. A reação envolvida é uma oxidação, que ocorre sob a influência da luz do sol. Os compostos orgânicos voláteis (VOCs) são decompostos especialmente na troposfera, a região mais baixa da atmosfera, para a qual são emitidos.

Na presença de óxidos de nitrogênio (NO_x), o ozônio pode ser formado. Os óxidos de nitrogênio não são consumidos durante a formação de ozônio, mas têm um comportamento catalisador semelhante. A presença de óxidos de nitrogênio pode ser igualmente um fator de origem humana, tão importante na formação fotoquímica de ozônio, como emissão de VOCs. O significado de NO_x para a formação de ozônio é, no entanto, refletida no fato de que dois conjuntos de fatores de equivalência que são usados - um para as emissões de VOCs, ocorrendo em áreas com baixa concentração de NO_x e outro para as emissões que ocorrem em áreas com alta concentração de NO_x (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

As fontes artificiais mais significativas de VOCs são o transporte rodoviário, com a sua emissão de gasolina não queimada e do diesel e a utilização de solventes orgânicos, por exemplo, em tintas. O petróleo bruto contém centenas de compostos que satisfazem esses critérios. O uso de produtos extraídos do petróleo bruto pode, portanto, resultar em emissão de muitas substâncias diferentes, com um potencial de formação de ozônio fotoquímico. O ozônio ataca compostos orgânicos em plantas e animais ou materiais expostos ao ar. Isto leva a um aumento da frequência de problemas do trato respiratório em humanos durante os períodos de nevoeiro fotoquímico nas cidades. Para a agricultura provoca uma redução no rendimento agrícola. A formação de ozônio fotoquímico é um impacto que afeta o meio ambiente em ambas as escalas locais e regionais (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Por meio análise dos resultados do potencial de impacto de formação de ozônio fotoquímico (alta concentração de NO_x) ilustrados nos gráficos da figura 45, verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C40 seguida pela C45 e C50.

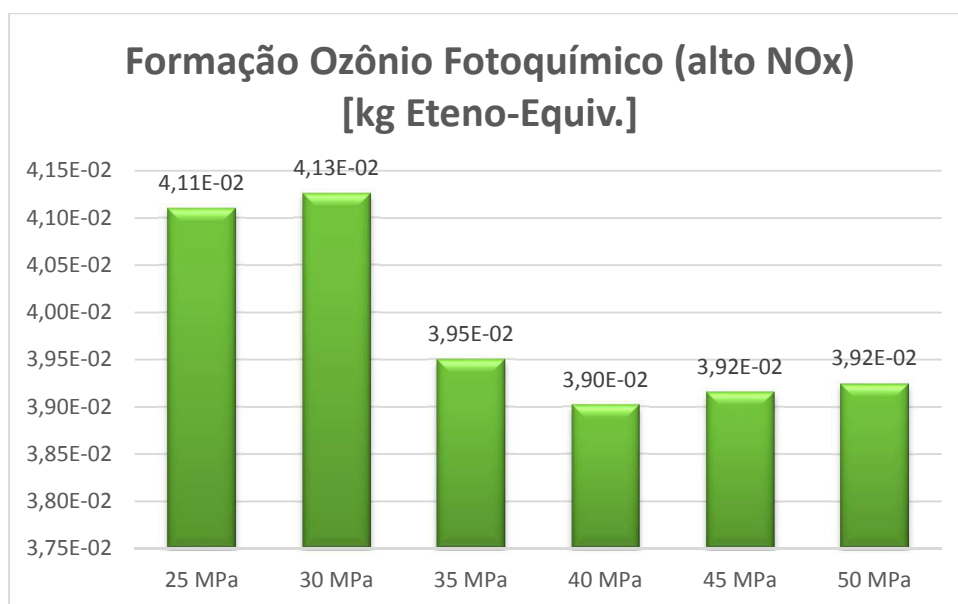


Figura 45 – Categoria de potencial de impacto de formação de ozônio fotoquímico (alta concentração de NO_x)

A variação da classe de resistência com a redução das peças estruturais entre a classe C25 de referência e a C40 de melhor resultado, resultou em uma redução de aproximadamente 5,1% no potencial de impacto.

Observando-se a figura 46 das parcelas de contribuição nesta categoria de impacto para a classe C25, verifica-se que a parcela relativa ao processo de produção da estrutura de concreto é a contribuição relevante.

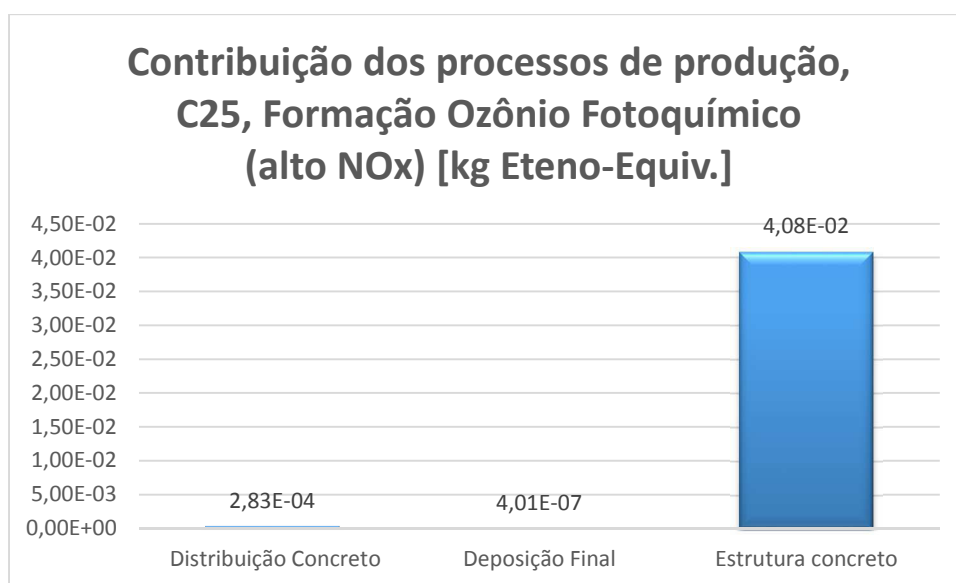


Figura 46 – Contribuição dos processos de produção para a classe C25
Categoria de potencial de impacto de formação de ozônio fotoquímico
(alta concentração de NOx), EDIP 1997

Nesta categoria de impacto, formação de ozônio fotoquímico (alta concentração de NOx), verifica-se a importância dos impactos relativos aos processos de transporte e queima de combustíveis na produção dos materiais. Este fato é comprovado pelo alto valor do processo de produção da madeira para as formas no processo da estrutura de concreto armado (aproximadamente 57%), observado na figura 47, relativo às grandes distâncias rodoviárias pela qual a madeira é transportada.

A pequena diferença dos valores obtidos entre as 3 maiores classes de resistência (C40, C45 e C50) é relativa a uma compensação entre a pequena diminuição na área de formas por m^2 com as variações devidas ao aço e o concreto.

Quando da manutenção da mesma área de formas por m^2 como entre as classes C25 e C30 e as classe C45 e C50, observou-se um ligeiro aumento, devido provavelmente ao maior consumo de cimento por m^2 , de construção mesmo com a redução do consumo de aço por m^2 .

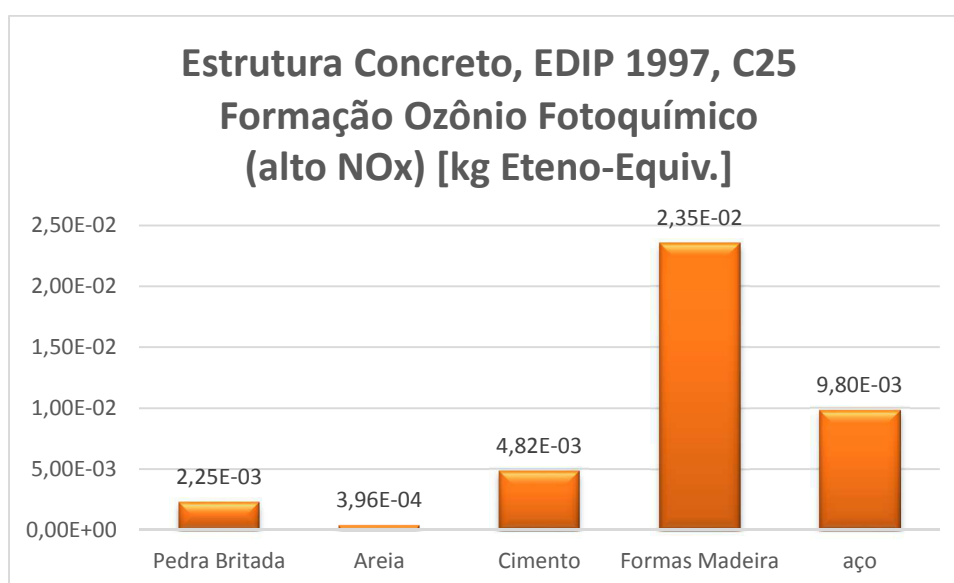


Figura 47 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de impacto de formação de ozônio fotoquímico
(alta concentração de NOx) EDIP1997

Quanto ao potencial de impacto da formação de ozônio fotoquímico (baixa concentração de NO_x), ilustrados nos gráficos da figura 48, verifica-se um resultado semelhante ao de alta concentração de NO_x. Também a C40 obteve o melhor resultado, seguida depois pela C45 e C50. A variação da classe de resistência com a redução das peças estruturais entre a classe C25 de referência e a C40 de melhor resultado, resultou em uma redução de aproximadamente 21,2% no potencial de impacto.

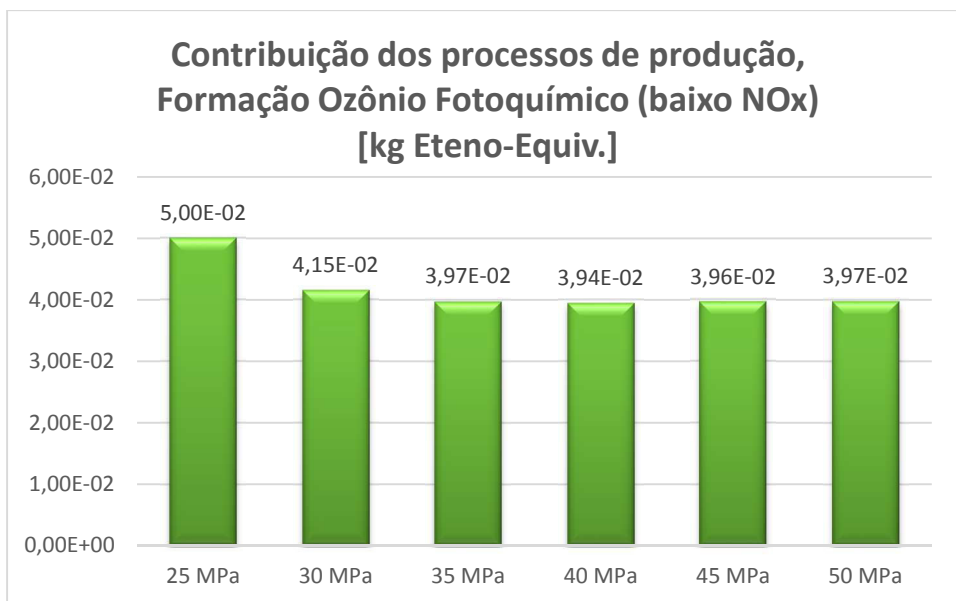


Figura 48 – Categoria de potencial de impacto de formação de ozônio fotoquímico (baixa concentração de NOx), EDIP 1997

Nesta categoria também o processo de fabricação da estrutura de concreto armado se mostrou preponderante entre os processos, como pode ser verificado na figura 49.

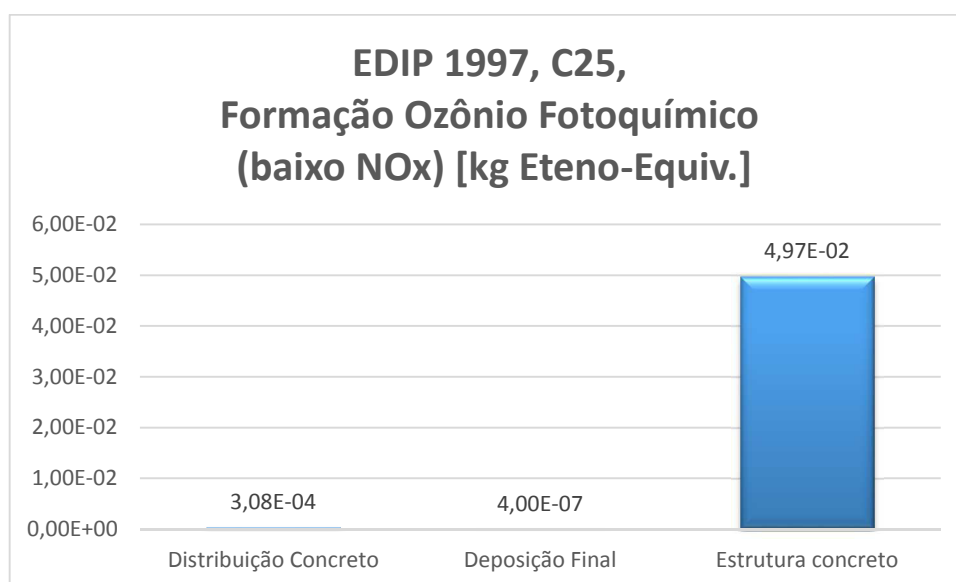


Figura 49 – Contribuição dos processos de produção para a classe C25 Categoria de potencial de impacto de formação de ozônio fotoquímico (baixa concentração de NOx)

Nesta categoria de impacto, formação de ozônio fotoquímico (baixa concentração de NO_x), assim como na de alta concentração de NO_x , verifica-se a importância dos impactos relativos aos processos de transporte observado nos gráficos da figura 50, do processo de produção da estrutura de concreto notadamente a madeira para formas que tem um papel preponderante no processo.

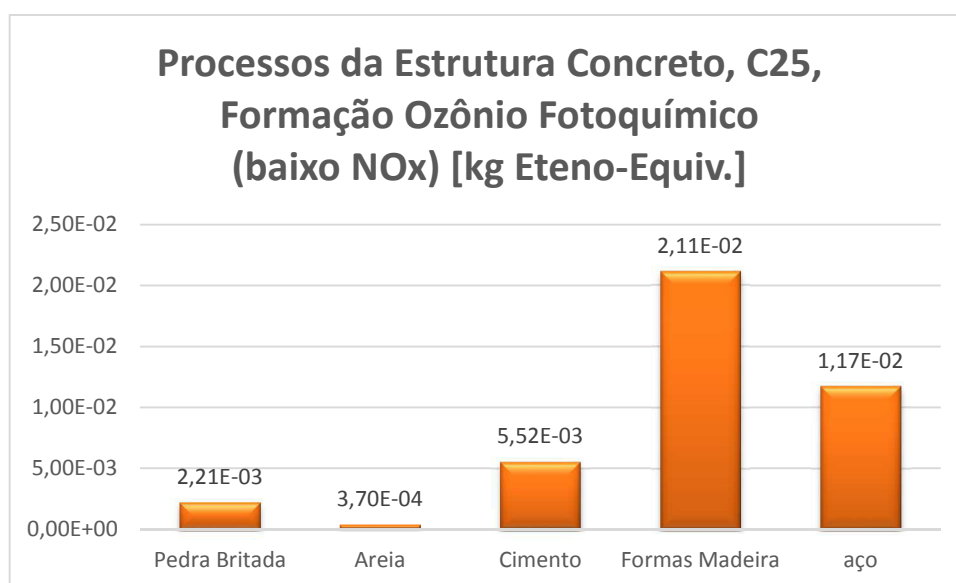


Figura 50 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Categoria de potencial de impacto de formação de ozônio fotoquímico
(baixa concentração de NO_x) EDIP 1997

Da mesma forma, a pequena diferença entre as 3 últimas classes (C40, C45 e C50) é relativa ao equilíbrio entre a diminuição mínima das formas por m^2 entre si que ainda se mostrou superior em ordem de grandeza as variações devidas ao aço e o concreto.

Quando da manutenção da mesma área de formas por m^2 entre as classes C25 e C30 ocorreu uma diminuição no impacto potencial, o que se explica pela redução na quantidade de aço/ m^2 (de $20\text{kg}/\text{m}^2$ para $19,3\text{kg}/\text{m}^2$ respectivamente) que é maior nesta categoria.

Entre as classe C45 e C50, a manutenção das peças estruturais resultou em um pequeno aumento nos impactos potenciais para a classe C50, devido ao maior consumo de

cimento por m^2 (de $68,04\text{kg}/m^2$ para $70,73\text{kg}/m^2$ respectivamente), comparado à mínima redução do consumo de aço por m^2 ($21,1\text{ kg}/m^2$ para $21,0\text{ kg}/m^2$), resultando no valor final observado.

7.8) Consumo de recursos energéticos não renováveis: As fontes de energia não renováveis são aquelas que se encontram na natureza em quantidades limitadas e se extinguem com a sua utilização. Uma vez esgotadas, as reservas não podem ser regeneradas. Consideram-se fontes de energia não renováveis os combustíveis fósseis (carvão, petróleo bruto e gás natural) e o urânio. Correspondem ao consumo de recursos consumidos nos processos elementares. São expressos em Kwh.

Na figura 51, são apresentados os gráficos dos valores dos recursos energéticos em Kwh, consumidos por m^2 de edificação para cada classe de resistência do concreto da estrutura analisada. No quadro 9 são apresentados os valores os valores totais e de cada material consumido.

Na categoria de consumo de recursos energéticos não renováveis verifica-se que a classe de resistência C40 foi a que apresentou o melhor resultado. A redução do consumo de recursos energéticos não renováveis sofreu uma diminuição dos valores de aproximadamente 10,8% da classe C25 para a classe C40.

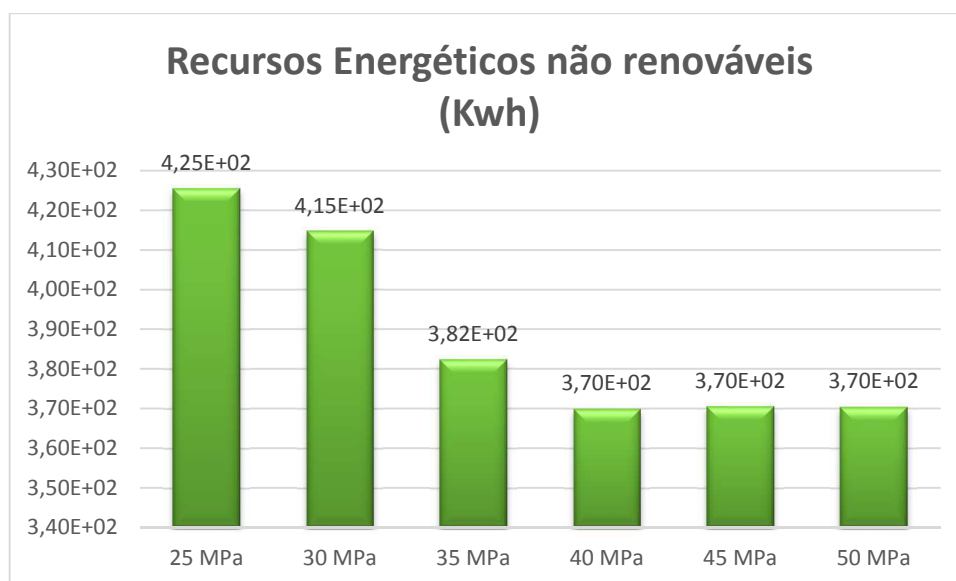


Figura 51 – Consumo de recursos energéticos não renováveis (Kwh)

Consumo recursos energéticos não renováveis	Classe de resistência					
	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Recursos Energéticos não renováveis [Kwh]						
Óleo Cru	2,60E+02	2,58E+02	2,38E+02	2,24E+02	2,24E+02	2,25E+02
Carvão Mineral	8,00E+01	7,59E+01	7,11E+01	7,37E+01	7,42E+01	7,36E+01
Lignita	8,26E+00	7,46E+00	6,21E+00	5,62E+00	5,54E+00	5,45E+00
Gás Natural	6,92E+01	6,60E+01	6,03E+01	5,98E+01	5,99E+01	5,96E+01
Turfa	1,54E-02	1,39E-02	1,15E-02	1,03E-02	1,01E-02	1,00E-02
Urânio	8,16E+00	7,58E+00	6,63E+00	6,36E+00	6,34E+00	6,27E+00
TOTAL	4,25E+02	4,15E+02	3,82E+02	3,70E+02	3,70E+02	3,70E+02

Quadro 9 – Consumo de recursos energéticos não renováveis(Kwh)

Pode ser observado na figura 52 que o processo relativo à produção dos materiais da estrutura de concreto armado foi um processo significativo.

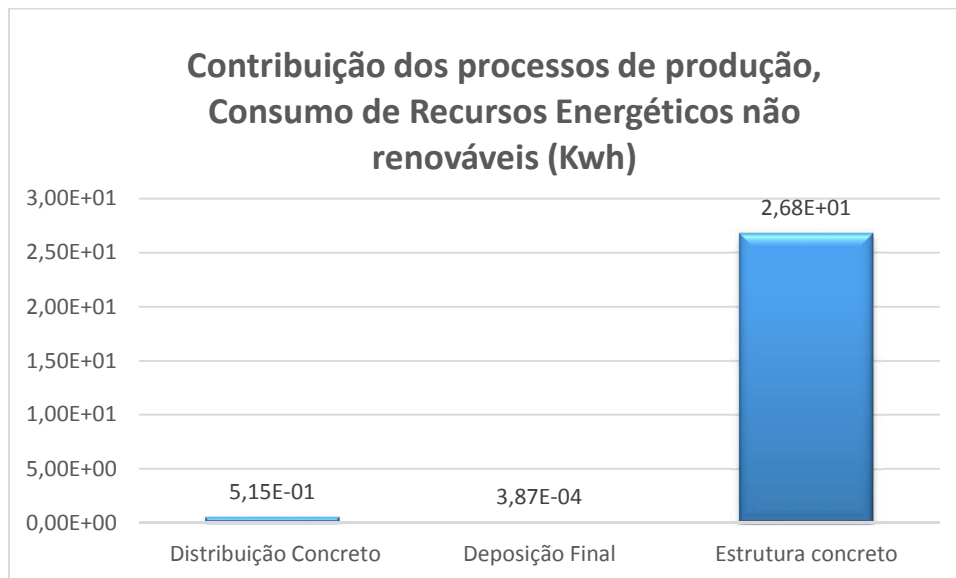


Figura 52 – Contribuição dos processos de produção para a classe C25
Consumo de recursos energéticos não renováveis

Da verificação das parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25 apresentadas na figura 53 a importância do transporte é destacada dada a maior contribuição da madeira para formas que é basicamente relativa a esse fator. A produção de aço é a segunda de maior potencial de impacto seguida pelo cimento, como esperado são fatores de grande importância dada a energia dispendida na produção destes materiais.

Entre as classes C25 e C30 percebe-se que a manutenção das seções, logo a manutenção do volume de madeira para formas, resulta em um aumento do consumo de cimento por m^2 (de $71,3\text{kg}/m^2$ para $78,2\text{ kg}/m^2$ respectivamente), porém a redução no consumo de aço (de $20\text{kg}/m^2$ para $19,3\text{ kg}/m^2$ respectivamente), compensou esse aumento e assim obteve-se uma redução no consumo de recursos energéticos não renováveis, evidenciando também a importância do aço nessa categoria de impacto.

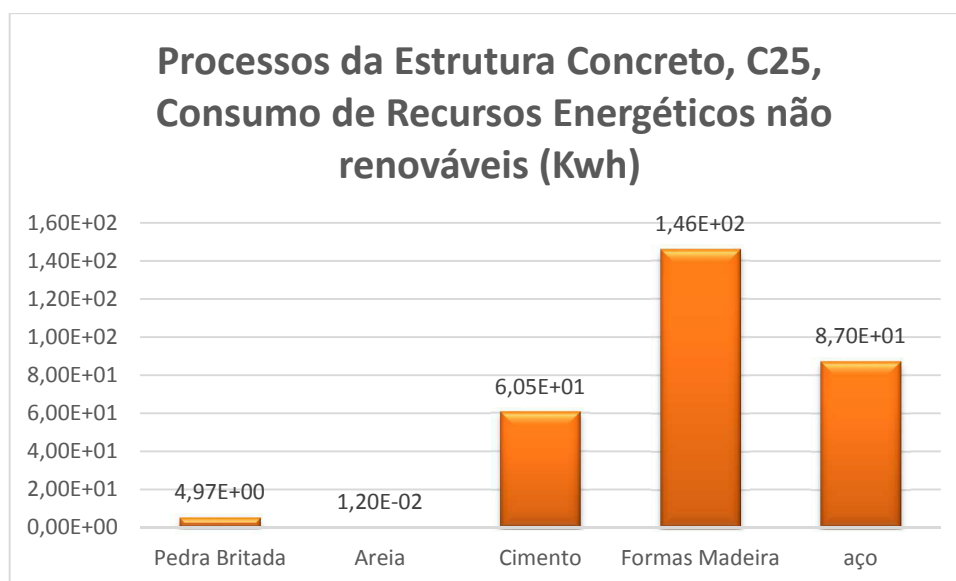


Figura 53 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Consumo de recursos energéticos não renováveis

Nas classes C35 a C50 ocorreu a redução nas formas de madeira (de 2,2m²/m² para 2,05 m²/m² de construção), o aço sofreu um aumento (de 19,3kg/m² para 21,1kg/m² de construção), seguido de uma redução no consumo de cimento (de 78,2 kg/m² para 68,04 kg/m² de construção). O equilíbrio entre estas três variantes resultou em um resultado mais favorável da classe C45.

No caso da comparação entre as classes C45 e C50, onde não ocorreu a redução das peças estruturais. Os condicionantes principais são o aço e o cimento, nessa ordem. O consumo de cimento da C45 para a C50 (de 68,04kg/m² para 70,73kg/m² respectivamente) aumentou porém, em contrapartida, o consumo de aço foi inferior na classe C50 (de 21,1 kg/m² para 21,0 kg/m²) resultando em um valor ligeiramente favorável à classe C50. A mínima diferença na redução do aço para a classe C50 foi suficiente para alterar o resultado.

7.9) Consumo de recursos energéticos renováveis: A energia renovável é a energia que é gerada a partir de processos naturais que são continuamente reabastecidos. Isso inclui a energia da luz solar , calor geotérmico, força eólica , energia da marés, energia da água, e várias formas de biomassa. Esta energia não pode ser esgotada e é constantemente renovada (PENNSYLVANIA EXTENSION, 2016). Os seus valores são expressos em Kwh.

Na figura 54 são apresentados os gráficos dos valores dos recursos energéticos renováveis em Kwh consumidos por m² de edificação para cada classe de resistência do concreto da estrutura analisada. No contexto brasileiro atual estes recursos deve ser admitidos como relativos a energia proveniente de usinas hidroelétricas.

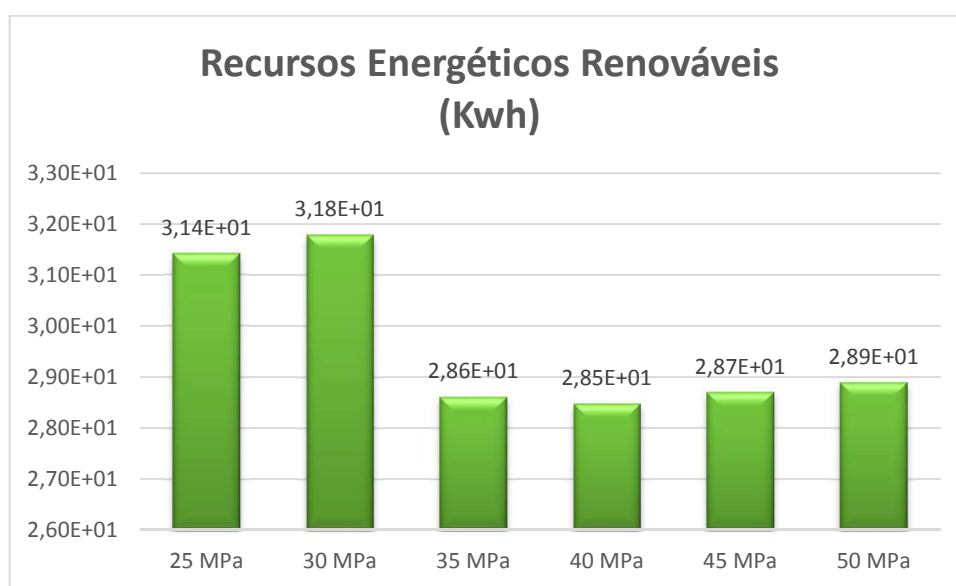


Figura 54 – Consumo de recursos energéticos renováveis (Kwh)

Na categoria de consumo de recursos energéticos renováveis, verifica-se que a classe de resistência C40 apresentou o melhor resultado. A redução das dimensões das peças estruturais se mostrou novamente vantajosa, já que todas as classes que sofreram a redução em relação a classe C25 de referência e resultaram em valores inferiores. A redução do

consumo de recursos energéticos não renováveis sofreu uma diminuição dos valores de aproximadamente 9,4% da classe C25 para a classe C40.

Pode-se observar na figura 55 que o processo relativo à produção dos materiais da estrutura de concreto armado são quase totais.

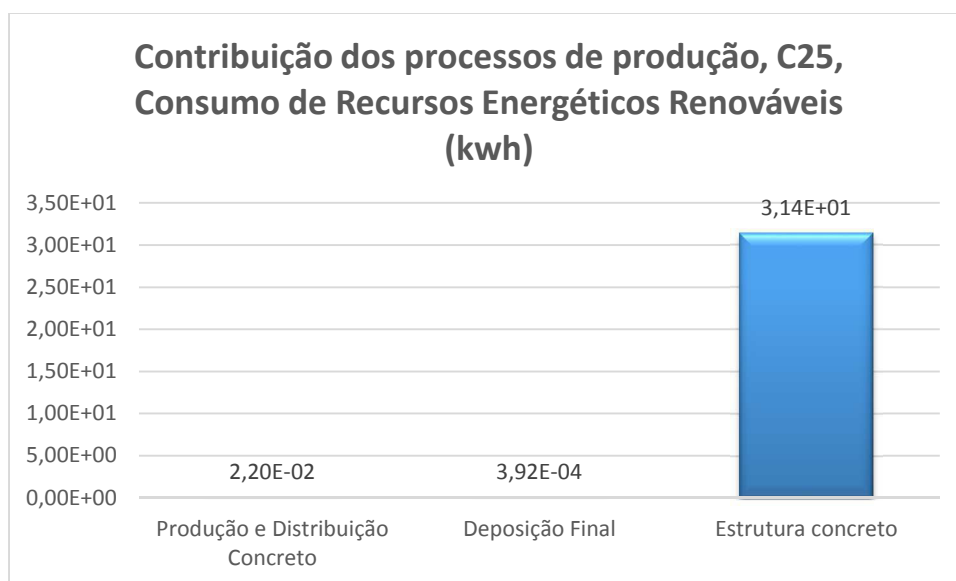


Figura 55 – Contribuição dos processos de produção para a classe C25
Consumo de recursos energéticos renováveis

Da verificação das parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe de referência C25, apresentadas na figura 56, a produção de aço é a consumida destes recursos energéticos renováveis, seguida do cimento. Como esperado são fatores de grande importância dada a energia consumida na produção destes materiais. Em seguida, a madeira para formas, e depois a areia e a brita.

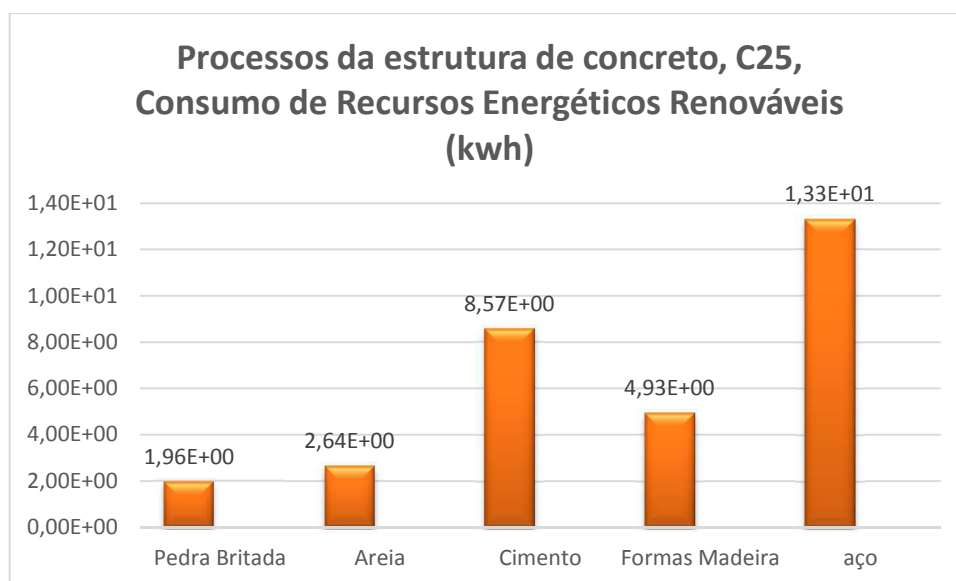


Figura 56 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Consumo de recursos energéticos renováveis

Entre as classes C25 e C30 percebe-se que a manutenção das seções resulta em uma redução no consumo de aço (de 20kg/m² para 19,3 kg/m² respectivamente), mas em contrapartida, um aumento no consumo de cimento por m² (de 71,3kg/m² para 78,2 kg/m² respectivamente), demonstrando que apesar do maior peso do aço neste quesito, a maior massa de cimento acabou prejudicando o resultado final.

No caso da comparação entre as classes C45 e C50, onde não ocorreu a redução das peças estruturais, o consumo de aço da C50 foi ligeiramente inferior ao da C40 (de 21,1kg/m² da C45 para 21,0 kg/m² da C50) mas o consumo de cimento da C45 para a C50 (de 68,04kg/m² para 70,73kg/m² respectivamente), resultou em um valor ligeiramente favorável à classe C45. A mínima diferença na redução do aço para a classe C50 não foi suficiente para alterar este resultado. Ainda verifica-se que apesar de ter apresentado o menor consumo de aço/m², a classe C35 apresentou apenas o segundo melhor resultado. Isto se deve ao maior consumo de cimento e formas desta em relação à classe C40 a melhor colocada.

7.10) Consumo de recursos materiais não renováveis: são recursos naturais esgotáveis, tais como, recursos minerais que não podem ser regenerados após a exploração, Alguns recursos importantes são a argila, calcário, minério de ferro, gipsita, etc. (OECD, 1997). Neste estudo corresponde à quantidade de recursos materiais não renováveis consumida pelo sistema expresso em quilos. Neste trabalho Foram também incluídos os consumos de areia e pedra britada.

Por meio da análise dos resultados do consumo de recursos materiais não renováveis ilustrados nos gráficos da figura 57, verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C45 seguida depois pela C40 e a C50.

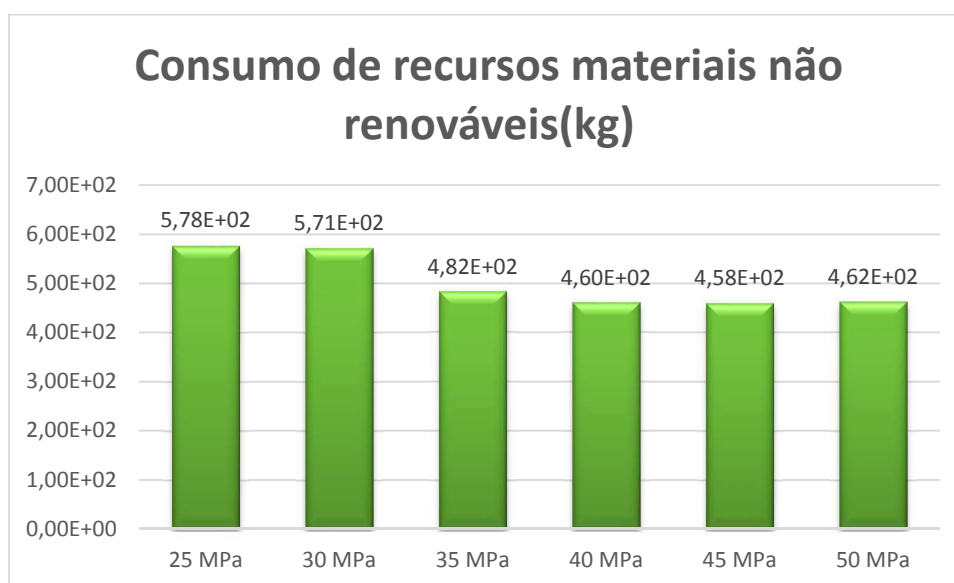


Figura 57 – Consumo de recursos materiais não renováveis.

Neste potencial de impacto se observa que a redução das peças estruturais em relação à classe C25 de referência foi vantajosa até a classe C50.

Pode-se observar na figura 58 que como esperado, o processo relativo à produção dos materiais da estrutura de concreto armado responde por quase a totalidade destes impactos.

Na figura 59, está ilustrada a parcela de contribuições neste processo para a classe C25.

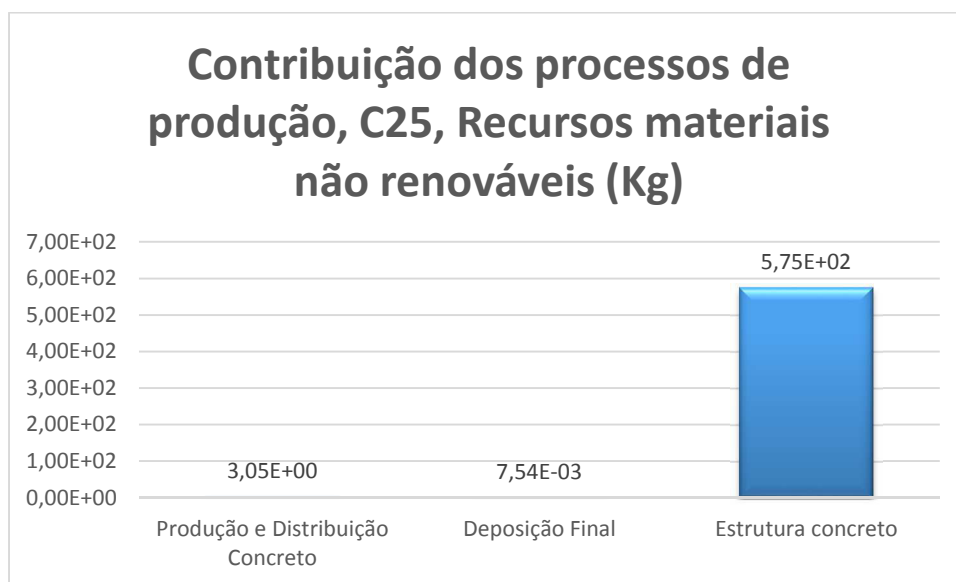


Figura 58 – Contribuição dos processos de produção para a classe C25
Consumo de recursos materiais não renováveis

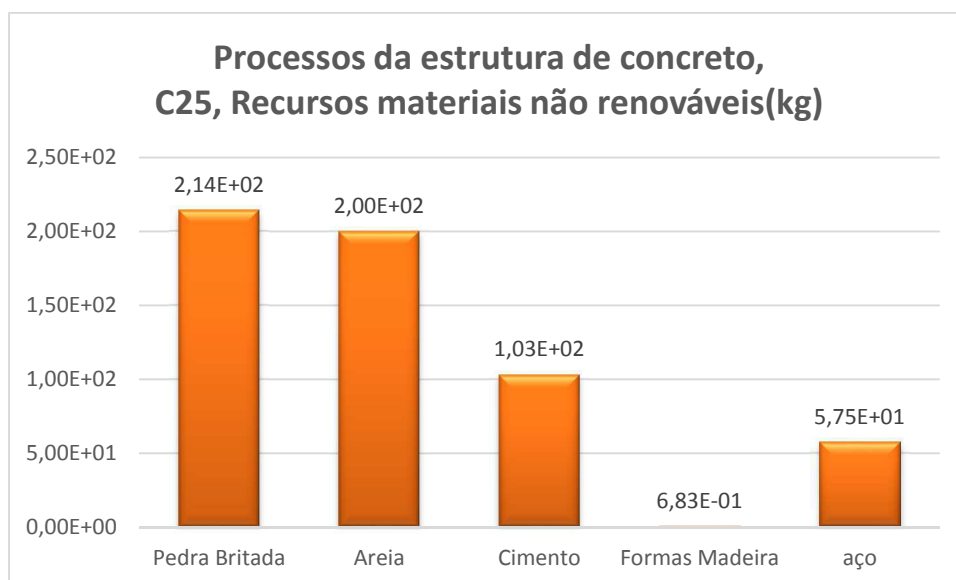


Figura 59 – Parcelas de contribuições dos materiais na estrutura de classe C25
Consumo de recursos materiais não renováveis

Na figura 59, verifica-se que dada a consideração dos consumos de pedra britada e areia, as maiores massas por m³ de concreto, foram a maior contribuição nos valores. A pedra britada corresponde a aproximadamente 37% do total e a areia 34,6% do total. No caso do cimento o valor foi 17,8% e o aço a 10% do total.

A classe C45, melhor colocada, não foi a que apresentou a menor taxa de cimento por m² entre as estruturas analisadas e nem a menor taxa de aço por m², dada a importância da quantidade de agregados empregada no concreto, juntos com 71,6%.

7.11) Consumo de recursos materiais renováveis: Recursos naturais renováveis são recursos naturais que, depois de sua exploração, podem voltar para seus níveis de estoque anteriores por um processo natural de crescimento ou reabastecimento (OECD, 1997), como por exemplo a energia solar, o ar, a água e os vegetais. Neste estudo, corresponde à quantidade de recursos materiais renováveis consumida pelo sistema expresso em quilos. Nesta categoria, o consumo de água corresponde a aproximadamente 97% do total nos processos e os 3% restantes ao ar, oxigênio e gás carbônico, florestas primárias e combustíveis renováveis.

Por meio da análise dos resultados do consumo de recursos materiais renováveis das classes de resistência, ilustrados nos gráficos da figura 60, verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C40.

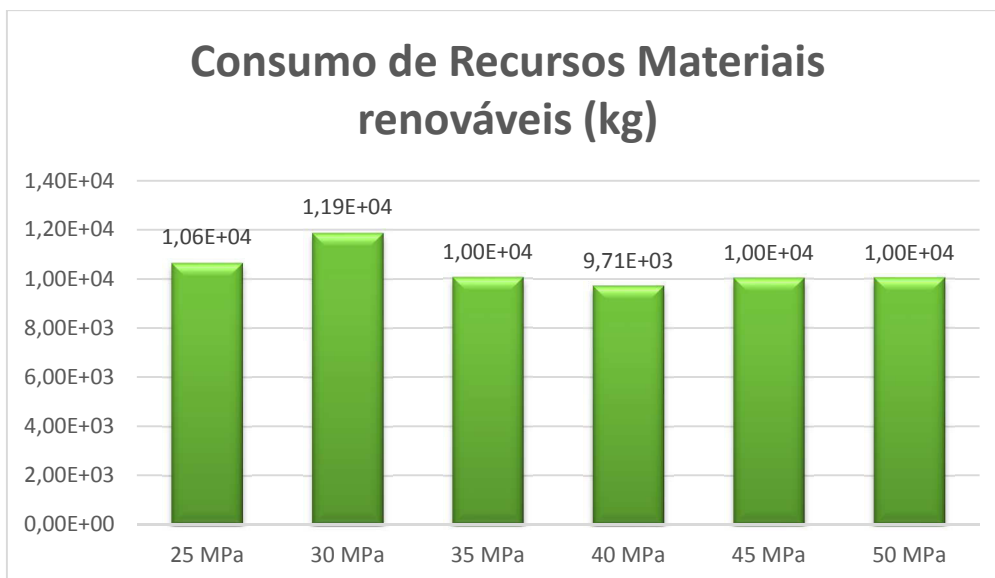


Figura 60 – Consumo de recursos materiais renováveis.

Pode-se observar na figura 61 que o processo relativo à produção dos materiais da estrutura de concreto armado responde novamente pela quase totalidade dos potenciais de impacto.

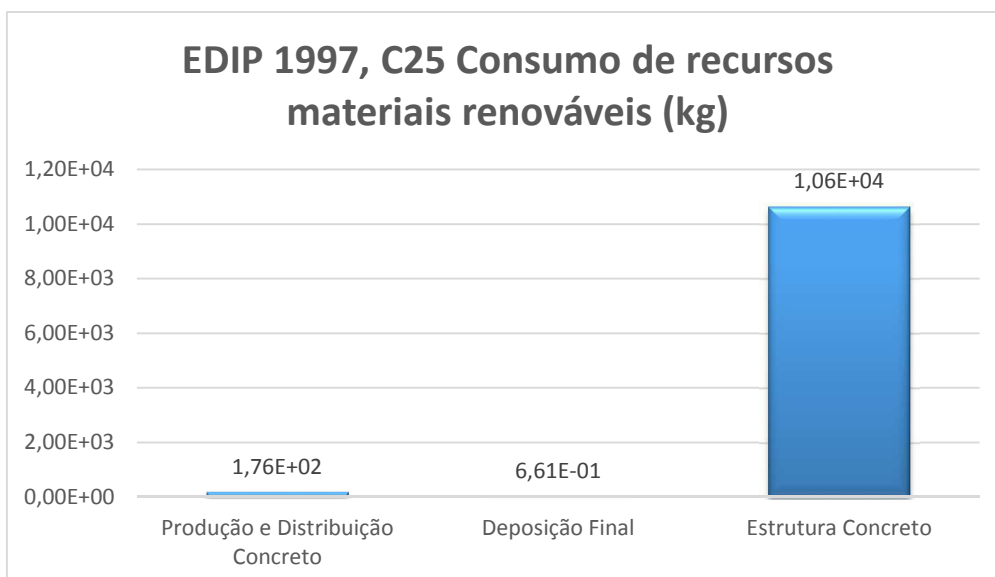


Figura 61 – Contribuição dos processos de produção para a classe C25 Consumo de recursos materiais renováveis

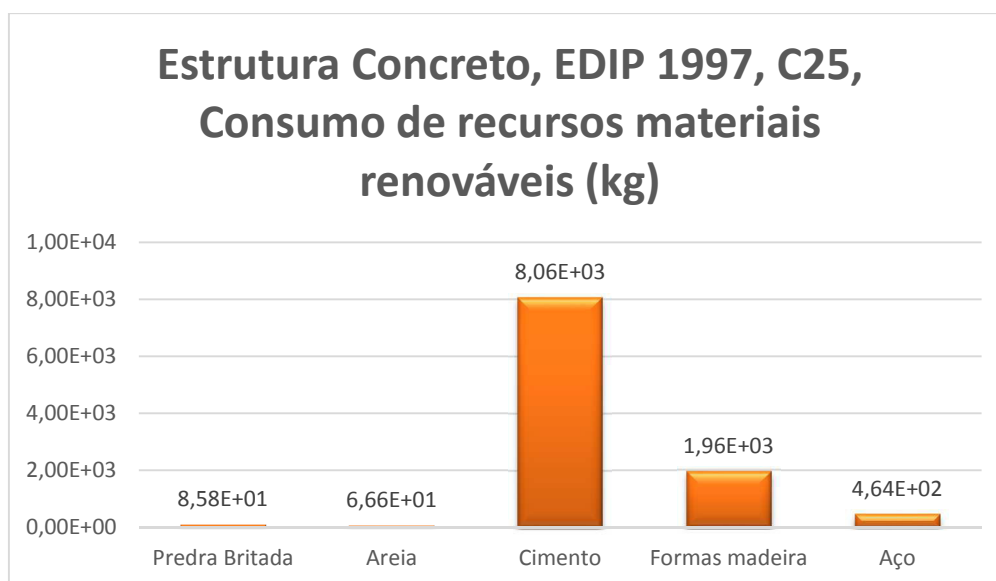


Figura 62 – Parcelas dos processos dos materiais na estrutura de classe C25
Consumo de recursos materiais renováveis

Estas contribuições ilustradas na figura 62 são compatíveis com a classificação obtida no consumo de recursos materiais renováveis das classes de resistência da figura 60.

O consumo de cimento que é o processo mais importante por larga margem nesta categoria, justifica a coerência dos valores obtidos, isto é, as estruturas com menor consumo de cimento/m² foram menos impactantes.

Estas conclusões podem ser verificadas por meio da análise do quadro 10. Neste quadro está apresentada a relação da classe de resistência da estrutura na sua ordem de potencial de impacto pelo consumo de cimento, formas e aço, por m² correspondentes.

Pode ser verificado na figura 63 os dados de consumo direto de água no traço do concreto/m² e do consumo de cimento/m². No gráfico verifica-se que a menor quantidade de água diretamente utilizada no traço do concreto não é o fator principal no resultado e sim a composição com o consumo de cimento e demais materiais. Destacando-se novamente que a água é o componente de maior peso nos recursos materiais renováveis.

Consumo de materiais da estrutura/m² x Classe de Resistência estrutura ordenada pelo menor impacto de consumo recursos materiais renováveis	Cimento (Kg/m²)	Madeira para Formas (m²/m²)	Aço (Kg/m²)
C40	66,13	2,05	20,9
C45	68,04	2,05	21,1
C50	70,73	2,05	21,0
C35	70,3	2,1	19,1
C25	71,3	2,2	19,3
C30	78,2	2,2	20,0

Quadro 10 – Relação entre o consumo de materiais da estrutura/m² x classe de resistência da estrutura ordenada pelo menor impacto de consumo de recursos materiais renováveis.

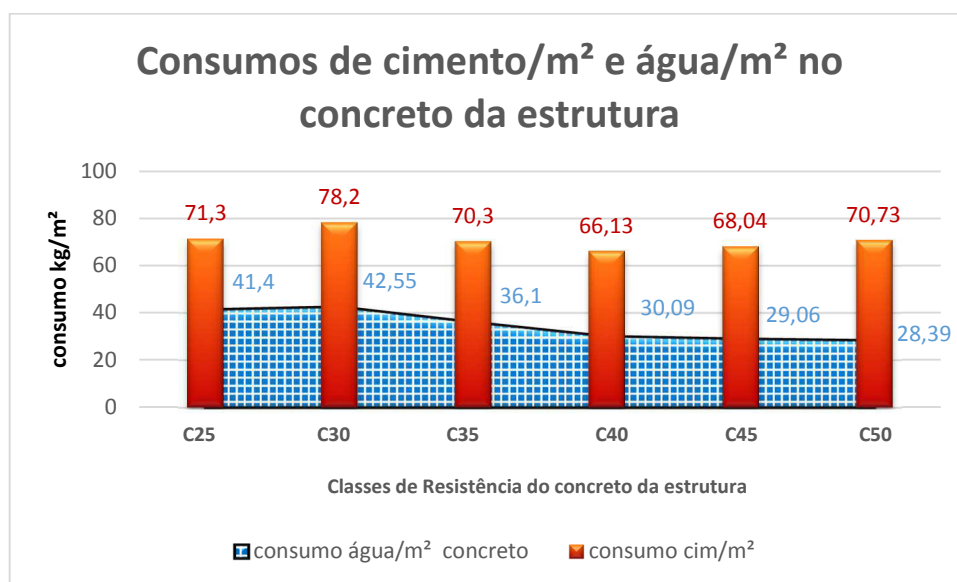


Figura 63 – Relação entre o consumo de cimento/m² e água/m² no concreto da estrutura

7.12) Geração de resíduos: corresponde à quantidade lixo e resíduos perigosos ao meio ambiente, escórias e cinzas, lixo nuclear, etc., expressa em quilos dos processos. Na verdade, existem as emissões não finais, mas atualmente não é possível resolvê-las de uma maneira aceitável, pois ainda não há processos unitários satisfatórios para o cálculo das emissões de resíduos. Os resíduos são classificados em quatro categorias, de acordo com o tipo de deposição ou de aterro: resíduos em massa , isto é, resíduos domésticos , resíduos de construção e similar levado a um aterro municipal; resíduos perigosos , ou seja , os resíduos trazidos para instalações de tratamento especiais; resíduos radioativos , ou seja, os resíduos de baixa intensidade de radiação para as centrais nucleares; e por fim as escórias e cinzas provenientes da incineração em usinas de energia movidas a carvão e instalações de incineração de resíduos, (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Os resultados de geração dos resíduos estão ilustrados nos gráficos da figura 64.

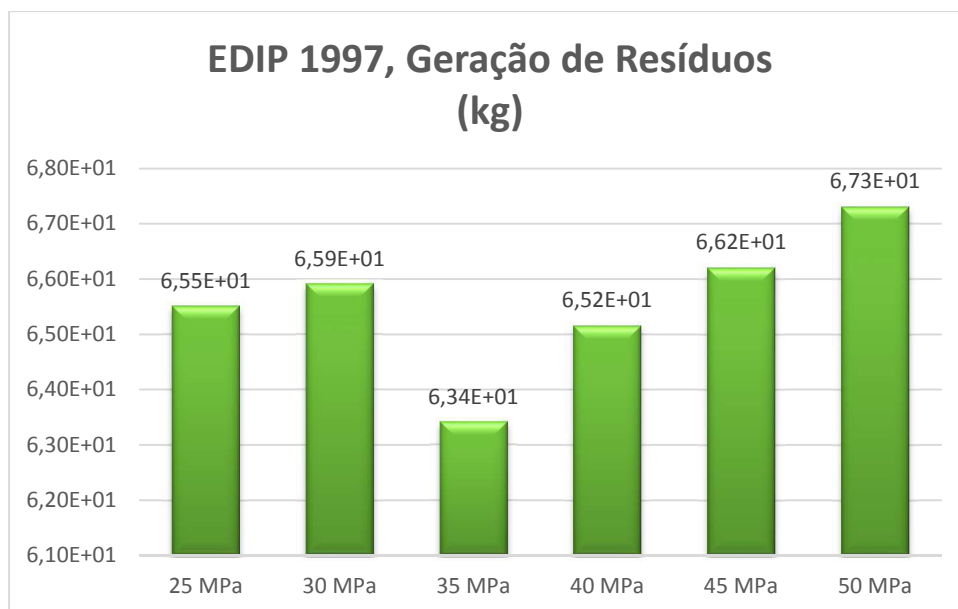


Figura 64 –Geração de resíduos

Pela análise dos resultados verifica-se que a classe de resistência que apresentou o melhor resultado foi a C35 seguida depois pela C40, C25, C30, C45 e a C50. Estes valores dentre todos os avaliados foi o que apresentou os resultados mais alterados da tendência de comportamento geral de todos os outros.

Nesta geração de resíduos, a importância é praticamente total do processo de produção da estrutura de concreto armado e seus materiais componentes, como pode ser verificado na figura 65.

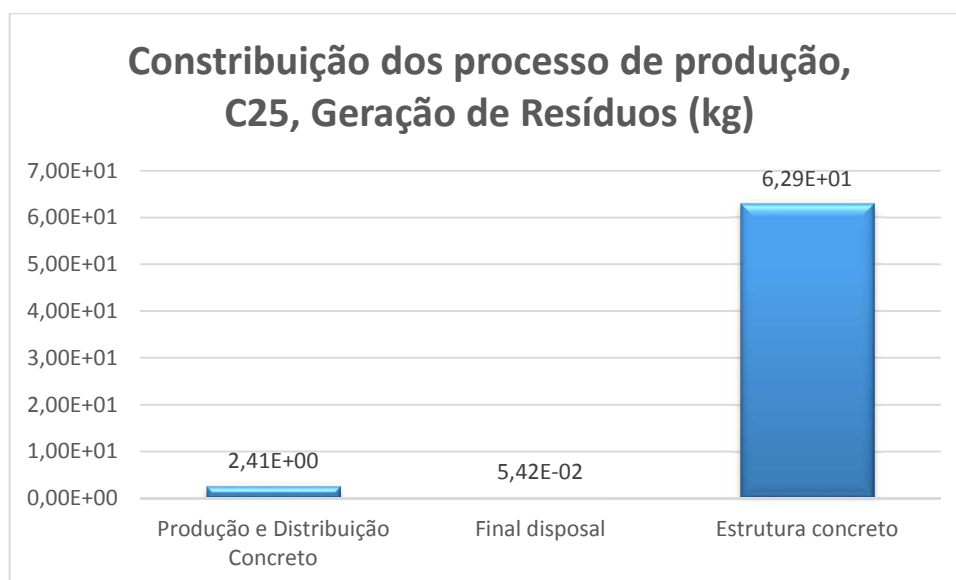


Figura 65 Contribuições dos processos de produção para a classe C25 na geração de resíduos

Nesta categoria de impacto, geração de resíduos, verifica-se a importância maior dos impactos relativos aos processo de produção do aço (65,66%) seguido dos processos da produção do cimento (33,22%), conforme figura 66.

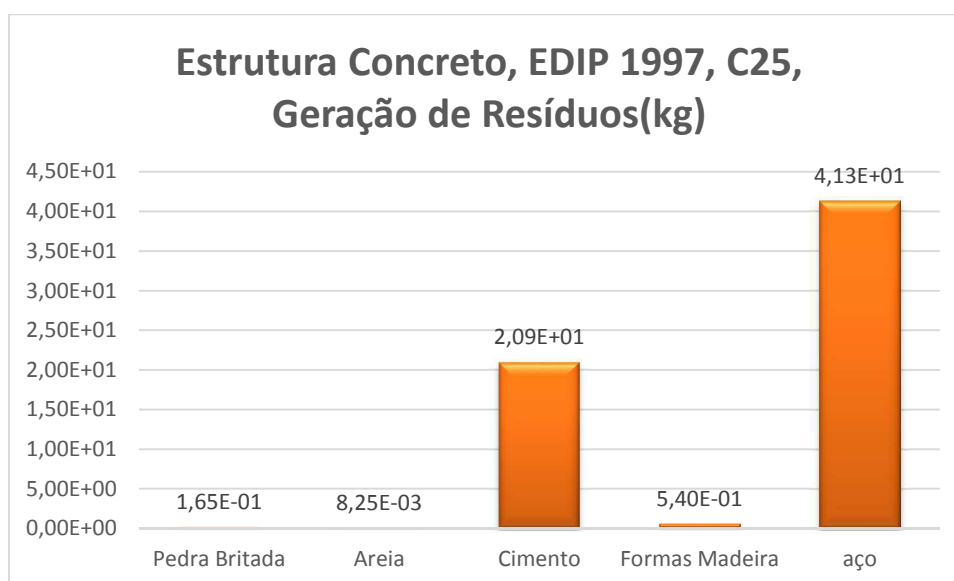


Figura 66 – Parcelas dos processos dos materiais na estrutura de classe C25
Geração de resíduos

No quadro 11 pode ser verificada a coerência da ordem dos resultados das classes de resistência do concreto da estrutura.

A classe C35 foi a que apresentou a menor taxa de consumo de aço/m² e a segunda menor taxa de cimento/m², e conseqüentemente foi a menos impactante. As classes C45 e C50 apresentaram a maior taxa de aço/m² e ficaram nas últimas colocações. A classe C30 apresentou uma taxa de aço um pouco menor (diferença máxima de 7,6%) que as classes C40 e C25 e um potencial de impacto maior. Isto se explica devido à taxa de cimento/m² superior à dessas duas classes de resistência (mais de 15% em comparação com a C40 por exemplo).

Consumo de materiais da estrutura/m² x Classe de Resistência da estrutura ordenada pelo menor impacto de geração resíduos	Cimento (Kg/m²)	Madeira para Formas (m²/m²)	Aço (Kg/m²)
C35	70,3	2,1	19,1
C40	66,13	2,05	20,9
C25	71,3	2,2	20,0
C30	78,2	2,2	19,3
C45	68,04	2,05	21,1
C50	70,73	2,05	21,0

Quadro 11 – Relação entre o consumo de materiais da estrutura/m² x classe de resistência da estrutura ordenada pelo menor impacto de geração de resíduos.

8. Interpretação

No quadro 12 pode ser observado o balanço geral dos resultados, onde foi efetuada uma classificação de desempenho da classe de resistência da estrutura em cada categoria de impacto analisada.

Classe Resistência x Categoria de impacto, consumo recursos e geração resíduos	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Potencial de acidificação	5	6	4	1	2	3
Ecotoxicidade crônica do solo	4	6	2	1	3	5
Ecotoxicidade aguda da água	5	6	4	1	2	3
Ecotoxicidade crônica da água	5	6	4	1	2	3
Potencial de aquecimento global	5	6	4	1	2	3
Toxicidade humana ao ar	5	6	1	2	3	4
Toxicidade humana ao solo	5	6	4	1	2	3
Toxicidade humana a água	5	6	2	1	3	4
Eutrofização	4	5	6	2	1	3
Potencial de destruição do ozônio	3	2	1	4	5	6
Formação de ozônio fotoquímico [alto NOx]	5	6	4	1	2	3
Formação de ozônio fotoquímico [baixo NOx]	6	5	4	1	2	3
Recursos energéticos não renováveis	6	5	4	1	3	2
Recursos energéticos renováveis	5	6	2	1	3	4
Recursos materiais não renováveis	6	5	4	2	1	3
Recursos materiais renováveis	5	6	4	1	2	3
Geração de resíduos	3	4	1	2	5	6

Quadro 12 – Balanço geral EDIP 97

Pode ser verificado que entre as 12 categorias de potencial de impacto, 4 de consumo de recursos e uma geração de resíduos, ao todo 17 verificações, a estrutura projetada com a classe de resistência do concreto C40 apresentou os melhores resultados em 12 aspectos analisados: acidificação, ecotoxicidade crônica do solo, ecotoxicidade aguda da água, ecotoxicidade crônica da água, potencial de aquecimento global, toxicidade humana ao solo, formação de ozônio fotoquímico (alto NOx), formação de ozônio fotoquímico (baixo NOx),

recursos energéticos não renováveis, recursos energéticos renováveis e por fim recursos materiais renováveis. Esta classe de resistência ainda obteve o segundo melhor resultado em mais 4 categorias. Apenas na categoria de impacto potencial de destruição de ozônio apresentou a quarta colocação.

A classe de concreto C35 é a que possui melhores valores em somente 3 categorias: toxicidade humana ao ar, potencial de destruição de ozônio e geração de resíduos. Obteve a segunda colocação em 3 avaliações: ecotoxicidade crônica do solo, toxicidade humana na água e recursos energéticos renováveis. Em todas as demais categorias de potencial de impacto resultou na quarta colocação apenas.

A classe C45 apresentou a melhor avaliação na categoria de potencial de eutrofização e quanto ao consumo de recursos materiais não renováveis. Por outro lado, obteve o segundo melhor resultado em 8 categorias avaliadas: acidificação, ecotoxicidade aguda da água, ecotoxicidade crônica da água, potencial de aquecimento global, toxicidade humana no solo, formação de ozônio fotoquímico (alta concentração de NOx), formação de ozônio fotoquímico (baixa concentração de NOx), recursos materiais renováveis.

As categorias de potencial de impacto e consumos de recursos que apresentaram os melhores resultados e praticamente iguais para diferentes classes de concreto foram:

- Ecotoxicidade crônica do solo: classes C35 e C40,
- Toxicidade humana ao ar: classes C35 e C40,
- Recursos energéticos não renováveis: C40 e C45.
- Recursos materiais não renováveis: C40 e C45.

A classe de resistência de referência C25 obteve como melhor resultado apenas duas terceiras colocações: potencial de destruição do ozônio e geração de resíduos.

A classificação evidencia a vantagem na redução das peças estruturais da estrutura de concreto armado proporcionada pelo aumento da classe de resistência do concreto em comparação com as classes C25 (de referência) e C30 (onde não foi efetuada a redução).

A classe de resistência C50 apresentou como melhor resultado apenas uma segunda colocação quanto aos recursos energéticos não renováveis. Este fato evidencia, para a unidade funcional avaliada, um limite no aumento da classe de resistência em que não é mais possibilitado o benefício na redução das peças estruturais. Esta impossibilidade ocorre devido às limitações físicas, de estabilidade e limitações das normas técnicas quanto à segurança da estrutura de concreto em situação de incêndio por exemplo. Apesar disso, em relação à classe C25 a classe C50 foi mais vantajosa em 14 dos 17 fatores avaliados, sendo ultrapassada apenas nos quesitos: ecotoxicidade crônica do solo, potencial de destruição de ozônio e geração de resíduos.

A premeditada manutenção das dimensões das peças estruturais entre as classe C25 e C30, também comprovou a ineficácia no procedimento. A classe C30, em relação à C25 de referência, obteve melhores resultados em apenas 4 quesitos: Potencial de destruição de ozônio, formação de ozônio fotoquímico (baixo NO_x) recursos materiais não renováveis e recursos energéticos não renováveis.

Em suma, os resultados demonstraram que o aumento das classes de resistência com a redução das peças estruturais foi vantajoso em relação à classe de referência C25 para a unidade funcional analisada, confirmando a hipótese proposta na pesquisa, ainda a classe C40 apresentou-se como a melhor classe estrutural, tendo em vista os potenciais de impacto ambiental e consumo de recursos naturais.

No quadro 13 são apresentadas o número de vezes que cada classe de resistência obteve nas classificação dos impactos.

Classe Resistência x Frequência na classificação e impactos	C25	C30	C35	C40	C45	C50
1ª colocação	0	0	3	12	2	0
2ª colocação	0	1	3	4	8	1
3ª colocação	2	0	0	0	5	10
4ª colocação	2	1	10	1	0	3
5ª colocação	10	4	0	0	2	1
6ª colocação	3	11	1	0	0	2

Quadro 13 – Balanço geral EDIP 97 – Classe de resistência x Frequência na classificação de impactos

8.1) Análise da sensibilidade

Para estudos realizados no Brasil, onde ainda não se dispõe de métodos específicos ao escopo geográfico local, a recomendação do trabalho intitulado “Avaliação do Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise da Sensibilidade” (BUENO, 2014), é da realização da AICV por diferentes métodos, de forma que a sensibilidade dos resultados do estudo fique clara para o tomador de decisão que for deles utilizar-se.

Seguindo a sugestão do referido trabalho, optou-se neste estudo pela avaliação comparativa por meio de mais 2 métodos de AICV para uma avaliação ao menos qualitativa da tendência dos resultados. Serão feitas avaliações pelos resultados obtidos pelo método EDIP 2003 e ILCD recommendation.

A avaliação não se dará diretamente em comparação com o EDIP 97, devido às diferenças de unidades adotadas em algumas categorias de impacto e metodologias das mesmas. Não obstante, a avaliação da classificação da ordem e frequência dos melhores

resultados referentes as classes de resistência serão efetuadas para uma verificação, no mínimo, das tendências gerais.

Um dos métodos escolhidos foi o EDIP 2003, que é uma continuação da metodologia do EDIP 97, que teve a inclusão da avaliação de exposição com base em informações regionais de AICV relacionado com categorias de impacto de emissões não-globais midpoint. O quadro 14 apresenta os resultados obtidos por esta metodologia.

No quadro 15 pode ser observado um balanço geral pela metodologia EDIP 2003 e os resultados onde foi efetuada uma classificação de desempenho da classe de resistência de cada estrutura em cada categoria de impacto analisada.

Classes de resistência de concreto da estrutura x Categorias de impacto potencial	C25	C30	C35	C40	C45	C50
EDIP 2003, Potencial de acidificação [m² UES]	6,00E+00	6,14E+00	5,83E+00	5,71E+00	5,74E+00	5,78E+00
EDIP 2003, Eutrofização aquática [Kg NO₃-Equiv.]	2,44E-01	2,48E-01	2,35E-01	2,27E-01	2,27E-01	2,29E-01
EDIP 2003, Aquecimento Global [Kg CO₂-Equiv.]	1,16E+02	1,20E+02	1,13E+02	1,11E+02	1,12E+02	1,13E+02
EDIP 2003, Formação de ozônio fotoquímico - impacto na saúde humana e materiais [pers*ppm*hours]	4,87E-02	4,97E-02	4,71E-02	4,59E-02	4,63E-02	4,67E-02
EDIP 2003, Formação de ozônio fotoquímico - impacto na vegetação [m² UES*ppm*hours]	7,08E+02	7,23E+02	6,85E+02	6,67E+02	6,71E+02	6,78E+02
EDIP 2003, Destruição do ozônio estratosférico [Kg R11-Equiv.]	2,51E-07	2,44E-07	2,36E-07	2,55E-07	2,58E-07	2,56E-07
EDIP 2003, Eutrofização Terrestre [m² UES]	1,25E+01	1,27E+01	1,20E+01	1,13E+01	1,17E+01	1,17E+01

Quadro 14: Categoria de impacto ambiental x Classe de resistência metodologia EDIP 2003

Classes de resistência de concreto da estrutura x	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Categorias de impacto potencial						
EDIP 2003, Potencial de acidificação [m² UES]	5	6	4	1	2	3
EDIP 2003, Eutrofização aquática [kg NO₃-Equiv.]	5	6	4	1	2	3
EDIP 2003, Aquecimento Global [kg CO₂-Equiv.]	5	6	4	1	2	3
EDIP 2003, Formação de ozônio fotoquímico - impacto na saúde humana e materiais [pers*ppm*hours]	5	6	4	1	2	3
EDIP 2003, Formação de ozônio fotoquímico - impacto na vegetação [m² UES*ppm*hours]	5	6	4	1	2	3
EDIP 2003, Destruição do ozônio estratosférico [kg R11-Equiv.]	3	2	1	4	6	5
EDIP 2003, Eutrofização Terrestre [m² UES]	5	6	4	1	2	3

Quadro 15 – Balanço geral EDIP 2003

Por meio da análise do quadro 15, pode ser verificado um resultado bem semelhante ao observado pela metodologia EDIP 97. Das 7 categorias analisadas por meio da metodologia EDIP 2003, 5 categorias apresentaram a mesma classificação da metodologia EDIP 97: potencial de acidificação, aquecimento global, eutrofização terrestre, destruição do ozônio estratosférico e os dois potenciais de formação de ozônio fotoquímico - impacto na saúde humana e formação de ozônio fotoquímico – impacto na vegetação, e eutrofização terrestre. Se comparados às 3 primeiras colocações de classes de resistência, todas as categorias de impacto foram correspondentes nos 2 métodos. A classe de resistência do concreto da estrutura com melhores resultados foi também a C40, apresentando o melhor resultado em 6 das 7 categorias de impacto avaliadas pelo método. Da observação dos impactos globais de ambos os métodos, o potencial de aquecimento global e o potencial de destruição de ozônio estratosférico, pode ser verificado que os resultados continuaram bem semelhantes, conforme ilustrado no quadro 16 onde tem-se a comparação.

Classes de resistência de concreto da estrutura x Categorias de impacto potencial	C25	C30	C35	C40	C45	C50
EDIP 1997, Aquecimento Global [Kg CO2-Equiv.]	1,17E+02	1,20E+02	1,14E+02	1,11E+2	1,12E+02	1,14E+02
EDIP 2003, Aquecimento Global [Kg CO2-Equiv.]	1,16E+02	1,20E+02	1,13E+02	1,11E+02	1,12E+02	1,13E+02
EDIP 1997, Destruição do ozônio estratosférico [Kg R11-Equiv.]	2,35E-07	2,29E-07	2,21E-07	2,39E-07	2,41E-07	2,40E-07
EDIP 2003, Destruição do ozônio estratosférico [Kg R11-Equiv.]	2,51E-07	2,44E-07	2,36E-07	2,55E-07	2,58E-07	2,56E-07

Quadro 16 – Correspondência das classes de resistência do concreto com as categorias de impacto ambiental globais Aquecimento Global e Destruição do Ozônio Estratosférico entre a metodologia EDIP 1997 e a metodologia EDIP 2003.

O Sistema de Dados do Ciclo de Vida de Referência Internacional (ILCD) publicou as Recomendações para Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida no contexto europeu (JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2011). O documento indica qual metodologia que tem sido avaliada como a melhor na categoria de impacto entre as disponíveis e descreve os indicadores e modelos recomendados para Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida mas ainda no contexto europeu.

Os resultados do método foram escolhidos para a avaliação, dada a abrangência da definição das metodologias que teriam as categorias que seriam mais adequadas.

O quadro 17 apresenta os resultados obtidos por esta metodologia e no quadro 18 pode ser observado um balanço geral por este manual de recomendações e os resultados onde foi efetuada uma classificação de desempenho da classe de resistência de cada estrutura em cada categoria de impacto analisada.

Por meio da análise do quadro 18, pode ser verificado um resultado semelhante ao observado pela metodologia EDIP 97, ao menos no que concerne aos melhores resultados da classe de resistência C40, que apresentou a primeira colocação em 11 das 15 das categorias

de impacto avaliadas e a segunda colocação em mais 1 categoria (Radiação ionizante midpoint saúde humana). Em 9 das categorias de impacto, as 3 primeiras posições foram das classes C40, C45 e C50, a maior parte, conforme os resultados dos métodos EDIP 97 e EDIP 2003.

Classes de resistência de concreto da estrutura x Categorias de impacto potencial	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Acidificação midpoint (v1.06) [Mole of H+ eq.]	4,83E-01	4,91E-01	4,66E-01	4,55E-01	4,56E-01	4,59E-01
Mudança Climática midpoint, excl Carbono Biogênico (v1.06) [kg CO ₂ -Equiv.]	1,13E+02	1,16E+02	1,10E+02	1,08E+02	1,10E+02	1,11E+02
Mudança Climática midpoint, incl Carbono Biogênico (v1.06) [kg CO ₂ -Equiv.]	1,16E+02	1,20E+02	1,13E+02	1,10E+02	1,11E+02	1,12E+02
Ecotoxicidade água doce midpoint (v1.06) [CTUe]	2,48E+01	2,50E+01	2,40E+01	2,37E+01	2,38E+01	2,39E+01
Eutrofização água doce midpoint (v1.06) [kg P eq]	7,86E-04	7,94E-04	7,61E-04	7,40E-04	7,39E-04	7,36E-04
Eutrofização marinha midpoint (v1.06) [kg N-Equiv.]	7,35E-02	7,35E-02	6,97E-02	5,64E-02	6,65E-02	6,65E-02
Eutrofização terrestre midpoint (v1.06) [Mole of N eq.]	2,10E+00	2,13E+00	2,01E+00	1,94E+00	1,95E+00	1,96E+00
Toxicidade humana midpoint, efeitos cancerígenos (v1.06) [CTUh]	9,40E-07	9,60E-07	9,20E-07	8,60E-07	8,90E-07	9,00E-07
Toxicidade humana midpoint, efeitos não cancerígenos (v1.06) [CTUh]	6,97E-06	7,17E-06	6,83E-06	6,80E-06	6,84E-06	6,84E-06
Radiação Ionizante midpoint, saúde humana (v1.06) [kBq U235 eq]	1,59E-01	1,62E-01	1,42E-01	1,45E-01	1,46E-01	1,48E-01
Destrução camada de ozônio midpoint (v1.06) [kg CFC-11 eq]	2,50E-07	2,43E-07	2,29E-07	2,54E-07	2,51E-07	2,49E-07
Material particulado/ inorgânico respiratório midpoint (v1.06) [kg PM _{2,5} -Equiv.]	1,55E-02	1,55E-02	1,48E-02	1,40E-02	1,41E-02	1,76E-02
Formação Ozônio Fotoquímico midpoint, saúde humana (v1.06) [kg NMVOC]	4,92E-01	4,93E-01	4,67E-01	4,48E-01	4,49E-01	4,49E-01
Esgotamento de recursos de água, midpoint (v1.06) [m ³ eq.]	- 1,31E+00	- 1,43E+00	- 1,32E+00	- 1,25E+00	- 1,25E+00	- 1,31E+00
Esgotamento de recursos minerais, fósseis e energias renováveis, midpoint (v1.06) [kg Sb-Equiv.]	1,52E-04	1,47E-04	1,45E-04	1,59E-04	1,61E-04	1,59E-04

Quadro 17: Categoria de impacto ambiental x Classe de resistência metodologia Recomendações ILCD Handbook.

Classes de resistência de concreto da estrutura x Categorias de impacto potencial	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Acidificação midpoint (v1.06) [Mole of H+ eq.]	5	6	4	1	2	3
Mudança Climática midpoint, excl Carbono Biogênico (v1.06) [kg CO ₂ -Equiv.]	5	6	3	1	2	4
Mudança Climática midpoint, incl Carbono Biogênico (v1.06) [kg CO ₂ -Equiv.]	5	6	4	1	2	3
Ecotoxicidade água doce midpoint (v1.06) [CTUe]	5	6	4	1	2	3
Eutrofização água doce midpoint (v1.06) [kg P eq]	5	6	4	3	2	1
Eutrofização marinha midpoint (v1.06) [kg N-Equiv.]	5	6	4	1	2	3
Eutrofização terrestre midpoint (v1.06) [Mole of N eq.]	5	6	4	1	2	3
Toxicidade humana midpoint, efeitos cancerígenos (v1.06) [CTUh]	5	6	4	1	2	3
Toxicidade humana midpoint, efeitos não cancerígenos (v1.06) [CTUh]	5	6	2	1	3	4
Radiação Ionizante midpoint, saúde humana (v1.06) [kBq U235 eq]	5	6	1	2	3	4
Destrução camada de ozônio midpoint (v1.06) [kg CFC-11 eq]	4	2	1	6	5	3
Material particulado/ inorgânico respiratório midpoint (v1.06) [kg PM _{2,5} -Equiv.]	4	5	3	1	2	6
Formação Ozônio Fotoquímico midpoint, saúde humana (v1.06) [kg NMVOC]	5	6	4	1	2	3
Esgotamento de recursos de água, midpoint (v1.06) [m ³ eq.]	4	6	5	1	2	3
Esgotamento de recursos minerais, fósseis e energias renováveis, midpoint (v1.06) [kg Sb-Equiv.]	3	2	1	4	6	5

Quadro 18: Balanço Geral - Metodologia Recomendações ILCD Handbook.

Entre as categorias possivelmente comparáveis, a de impacto global que apresentou uma maior diferença na classificação foi a de destruição da camada de ozônio, com a compensação de que a classe de resistência melhor colocada foi a mesma nas 3 metodologias, a classe C35.

Outra categoria de impacto contemplada neste método e de valor interessante foi a de “Material particulado/ inorgânico respiratório” e a classe C40 também se mostrou a melhor opção.

Concluindo, por meio do uso das 2 metodologias complementares ao trabalho - EDIP 2003 e Recomendações ILCD - foram confirmados os melhores resultados na maioria das categorias de impacto da classe de resistência C40, conforme obtido pela metodologia EDIP 97, confirmando os resultados e a maioria das classificações encontradas, validando, no mínimo, a avaliação quantitativa dos impactos potenciais das classes de resistência.

9. Implementação em projetos de concreto armado de conceitos de melhoria de desempenho ambiental das estruturas.

9.1) O processo de execução de projetos

Quando o proprietário/incorporador define-se pelo início do projeto de um empreendimento, contrata, em primeiro lugar, um escritório de arquitetura para que este execute os estudos preliminares e o arranjo geral da futura construção. Então, a altura do edifício, a sua esbeltez, o tamanho dos ambientes e dos vãos, a existência de peças em balanço, o pé-direito, o arrojado da concepção, entre outros aspectos arquitetônicos, definem preponderantemente o custo total da estrutura, uma vez que esta deverá ser projetada nos limites espaciais fornecidos pela arquitetura. (BATLOUNI NETO, 2005).

No processo de projeto convencionalmente utilizado pelo setor é comum que uma etapa de projeto de determinada especialidade dependa, para ser iniciada, do término de uma etapa de diferente especialidade, cujo grau de aprofundamento e maturação das decisões é equivalente ao da etapa (da outra especialidade) que se inicia. Por exemplo, a etapa de anteprojeto de estruturas de fundações tem como pré-requisito a etapa de anteprojeto de arquitetura (FABRICIO; BAÍA; MELHADO, 2008).

O projeto de arquitetura é desenvolvido a partir da pesquisa de mercado e aquisição do terreno e depois, é aprovado nos órgãos competentes, para obtenção de recursos financeiros e lançamento do empreendimento no mercado. Somente após a etapa de lançamento, é feita a contratação dos demais projetistas que irão participar do desenvolvimento do projeto. Desta forma, a atuação dos diversos projetistas envolvidos no processo não ocorre de maneira conjunta e o projeto é elaborado sem a efetiva contribuição

de todos os participantes ao longo das diferentes etapas do processo de projeto. Percebe-se assim que a fase de concepção do edifício ocorre de forma separada do desenvolvimento do projeto (FABRICIO; BAÍA; MELHADO, 2008).

As demandas por projetos e serviços de engenharia se materializam fundamentalmente através de parâmetros comerciais e mercadológicos, tais como preço, a facilidade de venda, e o atendimento de exigências de mercado como tipologia arquitetônica, especificações de acabamento, etc. Questões como qualidade dos serviços e dos projetos e o impacto destes no processo de produção não são devidamente consideradas (CARDOSO; SILVA; FABRICIO, 1998).

As demandas por soluções sustentáveis nos novos empreendimentos, com tecnologias construtivas complexas e fluxo de informações dinâmicas, pressionam e direcionam cada vez mais o setor da Arquitetura, Engenharia e Construção para o trabalho coordenado multidisciplinar (UECHI; PAULA; MOURA. 2013).

A arquitetura bioclimática ganhou importância dentro do conceito de sustentabilidade (GONÇALVES; DUARTE, 2006). Partindo da fase conceitual e da definição do partido arquitetônico, o projeto de um edifício deve incluir diversos tópicos como orientação solar, formas arquitetônicas, características das condicionantes ambientais, detalhamento de proteções solares, detalhamento de esquadrias, etc. e contemplado nesta pesquisa, o estudo dos materiais da estrutura.

Uma técnica importante consagrada na indústria da transformação e seriada, que pode ser aplicada na construção civil, para a melhoria no desempenho dos projetos em relação ao atendimento das necessidades dos usuários dos edifícios e dos clientes intermediários envolvidos na produção é o conceito da Engenharia Simultânea (E.S.).

A E.S. propicia a eliminação de muitos problemas de produção e de uso decorrentes do projeto, o que é potencializado por uma maior interação entre as fases de projeto e a consideração precoce das necessidades dos vários envolvidos no ciclo de vida do produto (FABRICIO; BAÍA; MELHADO, 2008).

A metodologia trata-se de projetar simultaneamente o produto e o processo de produção. O projeto buscando qualidade deve focar a construção como um todo, englobando todas as fases construtivas e todos os sistemas envolvidos (BATLOUNI NETO, 2005).

Diante das particularidades do setor da construção, uma solução alternativa para a aplicação de alguns dos princípios da E.S. foi desenvolvida (FABRICIO; MELHADO, 1998), dando ênfase à realização integrada das várias especialidades de projeto de produto e de processo. Foi então proposta a denominação *Projeto Simultâneo*, que visa marcar as adaptações na metodologia de desenvolvimento de produto com E.S. para as realidades e possibilidades imediatas do setor. As bases do Projeto Simultâneo, derivadas da Engenharia Simultânea são:

- realização em paralelo de várias “etapas” do processo de desenvolvimento de produto, em especial, desenvolvimento conjunto de projetos do produto e para produção;
- integração no projeto de visões de diferentes agentes do processo de produção, através da formação de equipes multidisciplinares;
- fomento à interatividade entre os participantes da equipe multidisciplinar com ênfase para o papel do coordenador de projetos como fomentador do processo;
- forte orientação para a satisfação dos clientes e usuários (transformação das aspirações dos clientes em especificações de projeto).

No decorrer do desenvolvimento dos projetos de construção civil, as inúmeras decisões tomadas pelos projetistas das mais variadas especialidades devem estar embasadas em diversos critérios. Em particular, na seleção de materiais, os critérios devem ser estabelecidos de modo a propiciar que estes atinjam os desempenhos esperados, mas também estejam coerentes com o orçamento estimado, respeitando as normas técnicas, os aspectos estéticos e o meio ambiente (BATLOUNI NETO, 2007).

Para o atendimento dos objetivos pretendidos, a coordenação de projetos deve garantir que as soluções técnicas desenvolvidas pelos projetistas de diferentes especialidades sejam congruentes com os objetivos do cliente, compatíveis entre si e com a cultura da empresa construtora (FABRICIO; MELHADO, 2004).

Em relação ao objetivo desta pesquisa quanto ao desempenho ambiental das estruturas de concreto armado, parece claro que vários agentes no processo de tomada de decisões na fase de projeto (proprietário, incorporador da obra, arquiteto) irão influenciar as decisões relativas ao projeto estrutural e que ainda devem ser complementadas, para a obtenção do sucesso, por procedimentos na fase executiva da construção (compra de materiais, contratação de tecnólogo de concreto, redução de perdas, etc.).

Assim, cada membro da equipe multidisciplinar, tem uma contribuição a dar no decorrer da elaboração do projeto estrutural, com vistas ao alcance de melhor desempenho ambiental somado aos esforços na fase executiva conforme sugerido no item 9.2.

A figura 67 ilustra as informações que alimentam um projeto estrutural fornecidas pela equipe multidisciplinar.

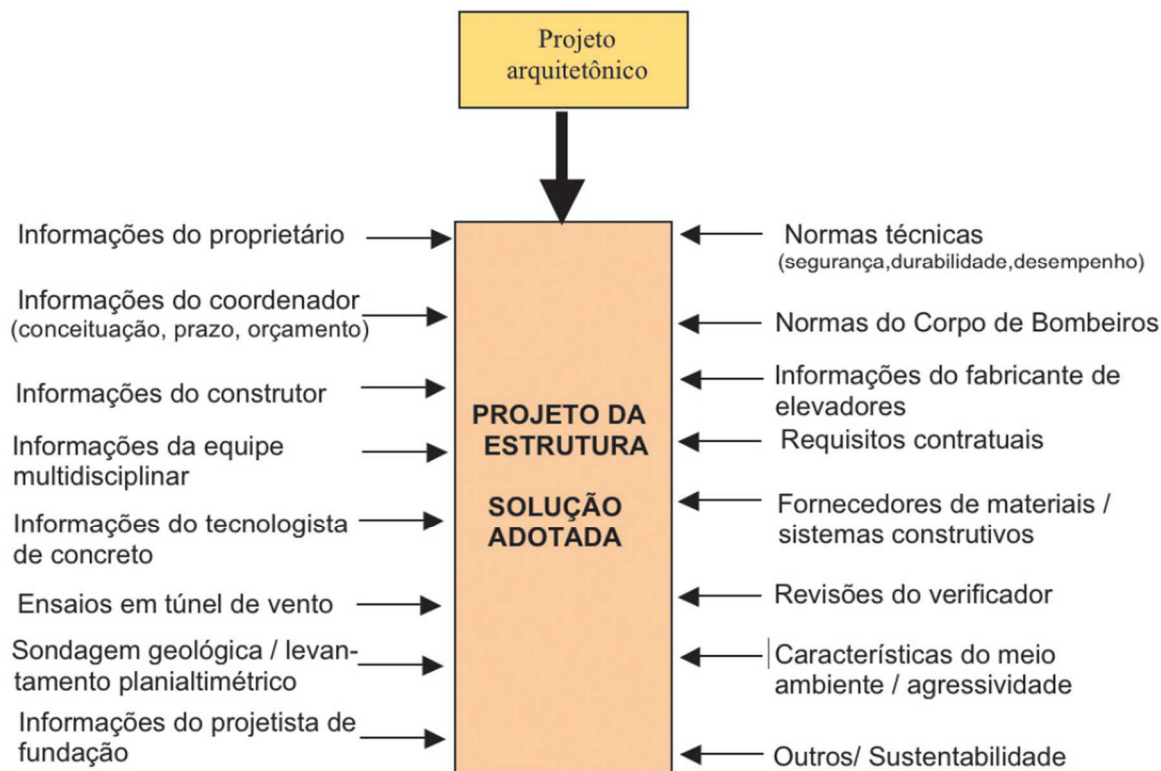


Figura 67 – Informações que alimentam o projeto estrutural fornecidas pela equipe multidisciplinar e outras fontes (BATLOUNI, 2005)

9.2) Contribuições de agentes participantes no projeto da execução da estrutura de concreto armado

A seguir seguem observações quanto às contribuições dos agentes participantes baseado em recomendações de (BATLOUNI, 2005; BATLOUNI, 2007) complementadas por esta pesquisas baseadas nos resultados obtidos pela ACV:

- Proprietário, incorporador da obra, cliente: deve definir a vida útil, o padrão de acabamento do edifício, a meta do custo da obra, etc., de modo a balizar as alternativas possíveis;

- Coordenador: figura de importância fundamental no projeto que, quando possível, deve ser um representante da construtora, é o responsável em garantir os aspectos de custo, técnico e exequibilidade. É também o responsável em fornecer ao projetista da estrutura os parâmetros e especificações a serem utilizados, as características do concreto junto ao tecnologista.
- Arquiteto: a concepção arquitetônica do projeto é o maior influenciador do custo potencial da obra do edifício. É de fundamental importância a participação e a interferência do arquiteto nas definições e detalhamentos construtivos e no lançamento da estrutura. Estruturas projetadas com simetrias, pilares sem a ocorrência de vigas de transição (evitando grandes volumes de concreto e consumo de aço), projetos racionalizados que resultem em economia de formas (principal material contribuinte em oito dos quesitos de impacto avaliados).
- Projetista da estrutura de concreto armado: o grande responsável pela eficiência global do projeto estrutural, influenciando de maneira decisiva o desempenho, a durabilidade e o custo final da construção.

A realização da ACV para as 5 classes de resistência da unidade funcional avaliadas, provou que a redução das peças estruturais, proporcionada pelo aumento das classes de resistência do concreto, é um procedimento favorável a um melhor desempenho ambiental da estrutura.

Os resultados demonstraram que as classes C40, C45 e C50 apresentaram os melhores resultados em todos os quesitos avaliados e especificamente a C40 se apresentou como a melhor opção em praticamente 80% dos casos. Pode ser verificado, que os melhores resultados de desempenho ambiental, obtidos por estas 3 classes, ocorreram com consumos de concreto de $0,168\text{m}^3/\text{m}^2$ e $0,17\text{m}^3/\text{m}^2$, conforme

ilustrado na figura 13. A classe C40 especificamente com o menor consumo de cimento, $66,13\text{kg}/\text{m}^2$ para um consumo de concreto de $0,17\text{m}^3/\text{m}^2$. As taxas de aço para estas 3 classes de resistência, associadas aos consumos de concreto e cimento citados foram de $122,3\text{ kg}/\text{m}^3$ a $125,3\text{kg}/\text{m}^3$ de concreto, correspondendo a valores de $20,9$ a $21,1\text{ kg}/\text{m}^2$ de construção, conforme ilustrado na figura 14. A classe C40 novamente, entre essas 3 classes, apresentou as menores taxas de aço em kg, $122,3\text{kg}/\text{m}^3$ de concreto e $20,9\text{kg}/\text{m}^2$ da estrutura.

Quanto às taxas de formas, as 3 classes apresentaram resultados iguais até a segunda casa decimal, $2,05\text{m}^2$ forma/ m^2 de área estrutural.

Em resumo, a indicação aos projetistas de estruturas, para a tomada de decisões no projeto de edificações semelhantes à unidade funcional analisada, é a de se utilizar como a primeira meta a redução máxima das peças estruturais. Em seguida a utilização da classe C40 como objetivo inicial e a verificação das taxas de concreto e aço, no caso desta classe de valores da ordem de $0,17\text{m}^3/\text{m}^2$ de concreto e $20,9\text{kg}/\text{m}^2$ de aço pela área estrutural (correspondendo a $122,3\text{ kg}/\text{m}^3$ de concreto). Os valores de taxas de consumo são facilmente obtidas por meio do uso de programas de cálculo e de verificação rotineira nos escritórios de projetos estruturais e muitas vezes solicitadas pelas contratantes.

No quadro 19 foi efetuado o levantamento dos custos totais das estruturas para as classes de resistência estudadas e respectivos índices encontrados, baseada em valores praticados localmente na região de estudo. Apesar da variação destes valores para cada região e por épocas diferentes, verifica-se que a classe C40 obteve o segundo menor custo, só perdendo para a C35, o que pode ser mais um atrativo para os contratantes optarem pela sua adoção.

Classe de Resistência x Material	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Concreto (m³/m²)	0,23	0,23	0,19	0,17	0,168	0,168
Custo R\$/m²	R\$ 66,7	R\$ 69,0	R\$ 59,9	R\$ 57,0	R\$ 61,3	R\$ 68,0
Aço (kg/m²)	20	19,3	19,1	20,9	21,1	21,0
Custo R\$/m²	R\$ 79,0	R\$ 76,2	R\$ 75,4	R\$ 82,6	R\$ 83,3	R\$ 83,0
Formas (m²/m²)	2,2	2,2	2,1	2,05	2,05	2,05
Custo R\$/m²	R\$ 39,7	R\$ 39,7	R\$ 37,9	R\$ 37,0	R\$ 37,0	R\$ 37,0
Total R\$/m²	R\$ 185,4	R\$ 184,9	R\$ 173,2	R\$ 176,6	R\$ 181,6	R\$ 188,0

Quadro 19: Custos da estrutura / m² x Classe de resistência - Custos Unitários de materiais e mão de obra¹

Outro fator a ser salientado, conforme avaliado na região estudada, é que as usinas de fornecimento de concreto tem certa facilidade em produzir concretos até a classe C40. Valores acima dessa classe de resistência para estas usinas em cidades médias como a estudada, não são usuais e demandam um maior controle tecnológico ainda não rotineiramente disponível. Este ponto é importante na tomada de decisão de projetista de estruturas em acordo com o contratante, da classe de resistência mais adequada à realidade de sua região. A classe C40 parece mais uma vez ser uma escolha razoável e realista na prática atual.

9.3) Contribuições de agentes participantes na execução da estrutura de concreto armado

- Tecnologista de concreto: é um especialista que seria imprescindível estar presente na fase de projetos e interferir positivamente e solidariamente, tanto na especificação do concreto para o projeto estrutural, quanto na execução da estrutura. Cabe a este em

¹ Custos unitários baseados na tabela do Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) – BH (02/05/2016): aço CA50 12,5mm, dobrado e cortado R\$3,95/kg; forma laje – R\$18,06/m². Custos de concreto praticados na cidade da pesquisa incluído caminhão bomba por m³: C25 R\$290,00/m³; C30 R\$300,00/m³; C35 R\$315,00/m³; C40 R\$335,00/m³; C45 R\$365,00/m³; C50 R\$405,00/m³.

acordo entre o projetista de estruturas, contratante e fornecedor do concreto, a determinação das características (módulo de elasticidade, consumo de cimento, etc.) e escolha de materiais, notadamente os cimentos com adições como premissa deste estudo para a obtenção dos resultados. Um cuidado a se ter é quanto à origem das adições introduzidas ao cimento, por exemplo no mercado norte-americano, onde os resíduos são adicionados na concreteira, observa-se que a valorização de sistemas de certificação da quantidade de resíduos em concretos tem levado à formulação de concretos com teores muito acima do necessário, utilizando, muitas vezes produtos importados da China. Esta estratégia é uma forma barata de se obter melhor classificação em certificações, mas também é um desperdício de recursos não renováveis escassos, o que provavelmente aumenta o impacto ambiental (AGOPYAN; JOHN, 2011). Outra opção a ser estudada pelo profissional é a substituição da areia natural extraída do leito ou margens de rios por pedra britada moída, o pode ser uma alternativa em alguns casos se existir a disponibilidade do material nas proximidades.

- Usina de Produção de Concreto: em conjunto com o tecnólogo de concreto deve prezar pela utilização dos materiais previstos e cuidados com desperdícios, descarte de restos de concreto, e parcimônia na utilização de água no sistema. Cumpre recordar que a usina de concreto que forneceu as informações primárias tem em média um consumo de 200 litros de água/m³ apenas referente à limpeza de caminhões e maquinário.
- Execução da obra: na obra tanto por razões óbvias de custos e desperdício afetando também o desempenho ambiental, as perdas devem ser controladas e a racionalização e organização física e de procedimentos deve ser efetuada. Já citada anteriormente a pesquisa “Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de

obras” (FINEP, 1998) encontrou no Brasil perdas em aço de até 16% e de concreto de até surpreendentes 23%. Outro cuidado especificamente quanto ao concreto na execução de obras é que, partindo-se do uso de cimentos com adições como utilizada nesta ACV, não pode ser esquecido que em certas aplicações, se houver a necessidade de desmoldagem rápida, principalmente em estações de clima frio, cuidados devem ser tomados. Na região em estudo, ocorreram diversos casos de quebra das “quinas” de vigas e pilares quando da retirada das formas laterais nas primeiras idades, obrigando o trabalho de recuperação das peças afetadas, resultando em consumos de materiais, tempo e aumento de custos.

- Responsável pela aquisição de materiais: além do cumprimento dos pressupostos acordados quanto ao concreto já citados anteriormente, um exemplo é quanto ao processo de escolha e especificação da madeira devendo-se ser levado em conta a sua origem, relacionando-a ao manejo florestal praticado. Como verificado na pesquisa, as grandes distâncias que percorre a madeira, mesmo legalizada, são enormes e tem um potencial de impacto importante na maioria das categorias analisadas. Nos cimbramentos das formas, a substituição de pontaletes de madeira por escoramentos metálicos, pois permitem o maior número de repetições, evitando o corte de árvores, a utilização de painéis compensados de madeira para forma com maior número de reaproveitamentos, podem ser soluções eficientes.

10. Considerações finais.

Por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa foi confirmada a hipótese inicial desta tese de que pode-se obter a melhoria do desempenho ambiental das estruturas de concreto armado por meio da avaliação, durante a fase de projeto, da utilização de diferentes classes de resistência do concreto, por meio de alterações nas dimensões dos elementos estruturais, bem como do consumo dos materiais componentes da estrutura. Com a utilização da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), e chegou-se às seguintes conclusões.

Os resultados demonstraram que as classes de resistência C40, C45 e C50 apresentaram os melhores resultados na grande maioria dos quesitos avaliados e especificamente a C40 se apresentou como a melhor opção para a unidade funcional avaliada.

Por meio do estudo dos resultados foi constatado, que os melhores resultados de desempenho ambiental, obtidos para as classes de resistência C40, C45 e C50, ocorreram com consumos de concreto na faixa de $0,168\text{m}^3/\text{m}^2$ e $0,17\text{m}^3/\text{m}^2$ de área estrutural. A classe C40 obteve o menor consumo de cimento/ área estrutural, $66,13\text{kg}/\text{m}^2$, para um consumo de concreto de $0,17\text{m}^3/\text{m}^2$.

As taxas de aço para estas três classes de resistência, associadas aos consumos de concreto e cimento citados foram de $122,3\text{kg}/\text{m}^3$ a $125,3\text{kg}/\text{m}^3$ de concreto, correspondendo a valores de $20,9$ a $21,1\text{ kg}/\text{m}^2$. A classe C40 novamente, entre essas três classes de resistência, apresentou as menores taxas de aço em kg, $122,3\text{kg}/\text{m}^3$ de concreto e $20,9\text{kg}/\text{m}^2$ da estrutura.

Quanto às taxas de formas, as três classes de resistência apresentaram resultados iguais até a segunda casa decimal, $2,05\text{m}^2/\text{m}^2$ de forma/área estrutural.

Verificou-se a impossibilidade de redução nas peças estruturais após a avaliação com a classe de resistência C45. A redução das peças estruturais apresentou um limite na sua promoção devido à limitações normativas e físicas.

Ainda foi efetuada uma avaliação de custos locais e a classe C40 apresentou o segundo melhor resultado entre as cinco analisadas, o que incentiva a sua utilização com fins de melhoria no desempenho ambiental além das vantagens econômicas. Uma observação e mais um estímulo é que, o aumento da classe de resistência do concreto conseqüentemente resulta em um aumento da durabilidade da estrutura, já que são fatores diretamente proporcionais. A classe C40 também é uma classe de resistência rotineira máxima usualmente produzida pelas usinas de concreto em cidades do porte da estudada, não sendo de muita complexidade o seu controle tecnológico.

Cumprir dizer que uma variação nos resultados numéricos é logicamente possível por diferenças regionais, principalmente quanto às distâncias consideradas e diferenças nos materiais de formas de madeira suas taxas de reaproveitamento e tipos de cimentos analisados. No caso da madeira, principalmente quanto ao alto consumo em lajes, verificou-se a importância da distância como principal fator condicionante dos resultados.

Constatou-se ainda que ACV da estrutura deve ser efetuada com a unidade funcional como foi concebida, isto é, de toda a estrutura composta do conjunto de todos os componentes estruturais. A estrutura funciona holisticamente, com a interação entre todos os componentes com suas funções interligadas.

A utilização da ACV se mostrou eficiente para a obtenção dos resultados, mas por outro lado a sua execução é complexa, demanda tempo e requer profissionais especializados neste tipo de estudo para a utilização de softwares e demais conhecimentos específicos.

Outro fator de agravamento na utilização da ACV foi a falta de dados ou dados incompletos de inventário ainda disponíveis no Brasil. A utilização da metodologia ainda deve ser utilizada de maneira simplificada, com uma versão de escopo reduzida, conforme apresentado pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (comentado no capítulo 4), até a formação de um banco de dados nacional confiável.

No trabalho também foi efetuada uma introdução aos princípios do chamado “Projeto Simultâneo” inspirado na “Engenharia Simultânea”, a respeito de todos os agentes envolvidos nos resultados de um projeto estrutural, com fins de um melhor desempenho ambiental da estrutura, a chamada equipe multidisciplinar.

Após a apresentação, foram efetuados comentários e orientações sobre todos os envolvidos na fase de projeto, especialmente no que diz respeito ao projetista de estruturas, e também indicações aos agentes envolvidos na execução da estrutura, de modo a ser obtido o sucesso pretendido, originalmente de um melhor desempenho ambiental da estrutura de concreto armado, respeitando-se a segurança, durabilidade e os custos.

No tópico 9.2 foram então pontuadas sugestões aos projetistas de estruturas, para a tomada de decisões no projeto de edificações semelhantes a unidade funcional analisada como em se utilizar como um primeiro objetivo básico a redução máxima das peças estruturais e a utilização como alvo a classe C40 com a verificação das taxas de concreto e aço. Nesta classe, a referência são valores da ordem de $0,17\text{m}^3/\text{m}^2$ de concreto e $20,9\text{kg}/\text{m}^2$ de aço pela área estrutural (correspondendo a $122,3\text{ kg aço}/\text{m}^3$ de concreto).

10.1) Continuidade da pesquisa.

Uma primeira sugestão para a continuidade de pesquisas referentes ao tema é da necessidade de coleta de dados nacionais para a montagem de inventários. Esta é uma tarefa árdua, pois depende da liberação de informações de diversas empresas participantes do setor da construção civil, o que talvez necessite de regulação governamental determinando a divulgação de dados como as Declarações Ambientais de Produtos detalhadas ou até o levantamento independente de tais dados.

Outra necessidade é a determinação de métodos e modelos de AICV que mais se aproximem do contexto nacional, e até o desenvolvimento de um método que atenda as especificidades do Brasil, para a obtenção de resultados quantitativos mais razoáveis e realistas

O desenvolvimento de ferramentas (softwares) mais práticas e de uso mais simples pelos profissionais da construção é necessária. Estas devem ser de uso e disponibilidade de apresentação de parâmetros e resultados livres, diferente do utilizado na pesquisa, por exemplo, onde a divulgação de dados do software GaBi é protegida por direitos autorais dos desenvolvedores, sendo apenas para avaliações internas.

O estudo aqui efetuado deve ser comparado com outros softwares aplicativos para a verificação da validade dos resultados e parâmetros adotados nos processos produtivos.

Também convém se indicar o estudo ambiental com o uso da ACV para outras unidades funcionais, como em padrões residenciais e comerciais, visando a verificação do comportamento quanto ao desempenho ambiental e avaliação de possíveis padrões comparativos entre elas, com o intuito de obtenção de índices entre as tipologias dos edifícios.

A verificação da influência , por exemplo, entre edificações de maiores alturas com altos valores de ação do vento e o caso de edificações unifamiliares.

Outras opções de materiais e soluções para as formas, principalmente para as lajes dado ao seu maior consumo, devem ser avaliadas com a incorporação dos potenciais de impacto específicos, como painéis compensados (fabricados a uma distância menor apesar de terem a influência de demais componentes, como resinas, tratamentos térmicos, etc., na sua confecção), ainda a utilização de lajes pré-moldadas e pré-moldadas protendidas (que praticamente dispensam o escoramento) necessitam ser estudados.

11. Referências.

ABCP – BT – 106 – **Guia básico de utilização do cimento Portland**, 2002.

ABREU, A. G.; DOTTO, J. M. R.; MULLER, I. L. **Corrosão do aço induzida por íons cloreto – Parte – 1: relação entre a resistência à compressão e o tempo de iniciação do processo de corrosão do aço embutido em concretos com ou sem pozolana**: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 52CBC0224, Outubro, 2010.

ACI-COMMITTEE 222. **Corrosion of metals in concrete**: ACI 222R-85, American Concrete Institute Journal, Proc. 82 (1), p. 3-32, 1985.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.; **O desafio da sustentabilidade na construção civil**: Série Sustentabilidade, vol. 5, Coordenador José Goldemberg, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 2011.

ANDRADE, C., FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P. R. L.; **Fatores Determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto**. BT/PCC/121 -Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia e Construção Civil, 1993.

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

ANDRADE, A. C.; AGOPYAN, V.; PALIARI, J. C.; SOUZA, U. E. L.; **Diagnóstico de combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva**: Ambiente Construído, Porto Alegre, vol. 4, n.4, p. 33-46, out./dez., 2004.

AQUINO, M.B., BARROS, V.S., MOTA S.; **Proposta de Gestão Sustentável dos Resíduos Sólidos da Construção Civil no Município de Fortaleza**: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, MS, setembro, 2005.

ASHLEY, E., **LCA of Concrete Structures**: National Ready Mixed Concrete Association - NRMCA, disponível em: <http://www.mnconcretecouncil.com/ftpgetfile.php?id=109>. [acesso em 08.01.2013]

ASSADOURIAN, E. **Ascensão e Queda das Culturas de Consumo**: Estado do Mundo, 2010: estado do consumo e o consumo sustentável/ World Watch Institute, p. 4, Salvador, BA, UMA Editora, 2010, 298 p.

ASSAHI, P. N. **Sistemas de execução de forma**. Texto de aula. Não publicado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, Rio de Janeiro, 238, p. 2014.

_____ **ABNT NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 5 p., 1980.

_____ **ABNT NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas**. Rio de Janeiro, 21 p, 1984.

_____ **ABNT NBR 8953:2009 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 3 p., 2015.

_____ **ABNT NBR 12721 – Avaliação de custos para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios - Procedimento**. Rio de Janeiro, 91 p., 2006.

_____ **ABNT NBR ISO 14031 – Gestão ambiental - Avaliação do desempenho ambiental - Diretrizes**. Rio de Janeiro, 44 p., 2013.

_____ **ABNT NBR ISO 14040 – Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 21 p., 2009.

_____ **ABNT NBR ISO 14044 – Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 46 p., (versão corrigida 2014), 2009.

_____ **ABNT NBR 15200 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 48 p., 2012.

_____ **ABNT NBR 15575-1 – Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 71 p., 2013.

AISC – AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Structural steel: An industry overview**. April, 2013. Disponível em :

<https://www.aisc.org/uploadedFiles/SteelDay/2011/Documents/Sept.%20%20Industry%20verview.pdf>

BARROS, V. S. **Proposta de Gestão Sustentável dos Resíduos Sólidos da Construção Civil no Município de Fortaleza**: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2004.

BATLOUNI NETO, J. **Diretrizes do projeto de estrutura para garantia do desempenho e custo**. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações, v.1, Editor Geraldo Cechella Isaia, São Paulo, IBRACON, 2005.

BATLOUNI NETO, J. **Critérios de projeto para seleção de materiais**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, v.1, Editor Geraldo Cechella Isaia, São Paulo, IBRACON, 2007.

BJEGOVIĆ, D.; ROSKOVIĆ, R. **Role of mineral additions in reducing CO2 emission**: Cement and Concrete Research, n. 35, 974-978, 2005.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da resistência à compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil] Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Vitória, 2004.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 2ª edição, Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2005.

BRE – BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT; **The Durability of steel in concrete: part 1; mechanism of protection and corrosion**: Building Research Establishments Digest, Digest 263, Jul. 7 p., 1982.

BREMNER, T. W., **Environmental Aspects of Concrete: Problems and Solutions**: Invited Paper for the Plenary Session of the 1a All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete, 9-14 september, 2001.

BRIBIÁN, I. Z.; USÓN, A. A.; SCARPELLINI, S. **Life cycle assessment in buildings: State-of-the art and simplified LCA methodology as a complement for building certification**: Building and Environment, 44, 2510-2520, 2009.

BROWN, L. R., **Plano B 4.0 – Mobilização para Salvar a Civilização**. Earth Policy Institute. New Contente Editora e Produtora, capítulo 11, 124-129, 2009.

BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade.** Tese(Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Área de Concentração em Arquitetura Urbanismo e Tecnologia – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BULL, W. B.; Yu, C. W. **Durability of materials and structures in building and civil engineering:** CRC Press LLC, Boca Raton, USA, 2006.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. **Life cycle assessment in the construction sector: A review:** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 379–388, 2013.

CABEZA, F. C.; RINCÓN, L.; VILARINO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. **Life cycle assessment and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review:** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, 394–416, 2014.

CARDOSO, F. F.; SILVA, F. B.; FABRICIO, M. M.; **Os fornecedores de serviços de engenharia e projetos e a competitividade das empresas de construção de edifícios:** Seminário Internacional de Arquitetura NUTAU – FAUUSP, São Paulo, 1998.

CARVALHO, J. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada à construção civil - Estudo de Caso: comparação entre Cimentos Portland com adição de resíduos.** Dissertação (Mestrado em Eng. Civil) - EPUSP, 102 f, 2002.

CARVALHO, C.; JAVALI, S.; PEYROTEO, A; **Avaliação ambiental comparativa de estruturas metálicas e de betão armado:** Simpósio Íbero-Americano “O betão nas Estruturas”, Coimbra, 2005.

CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo, PINI, Goiânia, Editora da UFG - PINI, 1997.

CASCUDO, O. **Inspeção e Diagnóstico de Estrutura de Concreto Armado com problemas de Corrosão de Armaduras.** Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações, Geraldo C. Isaia (Editor), p. 1071-1108, IBRACON, 2005.

CASCUDO, O. CARASEK, H.; FERREIRA, R. B.; MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais:** Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 52CBC0178, Outubro, 2010.

CBCS – CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Avaliação do Ciclo de Vida Modular.** Disponível em: <http://www.acv.net.br/website/acvs/show.asp?ppgCode=B7EEA3A3-747A-457B-8210-EC73F949FB82> acesso em [03.09.2015]

CEB - Comité Euro-International du Béton, Durable Concrete Structures – Design Guide. Thomas Telford Services Ltd, Londres, 1992.

CEB - Comité Euro-International du Béton, **Durability of Concrete Structures, Report of CEB – RILEM International Workshop:** Copenhagen, Mai, 1983; também CEB Bulletin D'Information, N2 152, 1984.

CEB - Comité Euro-International du Béton, **Durability of Concrete Structures, State of the Art Report:** Bulletin D'Information n. 148, Paris, 1982.

CHEN, Y.; OKUDAN, G. E.; RILEY, D. R. **Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings:** Automation in Construction, 19, 235-244, 2010.

CHEVALIER, J.L.; LE TENO, J.F. **Requirements for an LCA-based model for the evaluation of the environmental quality of building products:** Building and Environment, vol. 31(5), pp. 487–91. 1996.

CHEVALIER, J.; PEUPOORTIER, B. **Life cycle assessment methodologies in the construction sector: From research to current application:** International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10-12, Nantes, France, 2012.

CHROMÁ, M.; ROVNANIK, P.; TEPLÝ, B. **Carbonation modelling and reliability analysis of RC structures made from blended cements:** International RILEM Workshop on Performance Evaluation and Indicators for concrete durability, 19-21, March, Madrid, Spain, 2006.

CIB - INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, **Agenda 21 on sustainable construction:** CIB Report Publication 237, 130 pg., 1999.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO; **Nosso Futuro Comum.** 2ª Edição, FGV, Rio de Janeiro, 1991.

CONAMA: **Resolução n. 307 do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE de 05 de julho de 2002**. Diário Oficial da União, n. 136, de 17 de julho de 2002 – Seção 1.

CUNHA, A. C. Q.; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**: BT/PCC/283 -Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia e Construção Civil, 2001.

CYBIS, L.F e SANTOS C.V.J., **Análise do ciclo de vida (ACV) aplicada à indústria da Construção Civil – Estudo de Caso**: XXVII Congresso Internacional de Engenharia Sanitária e Ambiental, VI-036, p. 9., 2000.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações, Geraldo C. Isaia (Editor), V. 1, pg. 345-379. IBRACON, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C.; PAULETTI, C.; POSSAN, E. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.7, n. 4, p. 7-20, out./dez., 2007.

DONG, Y. H.; THOMAS Ng, S.; KWAN, A. H. K.; WU, S. K. **Substituting local data for overseas life cycle inventories – a case study of concrete products in Hong Kong**: Journal of Cleaner Production, 87, 414-422, 2015.

EUR 24892 – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. **JRC Referende Report on the International Reference Life Cycle Data System (ILCD Handbook)**. Luxembourg Publications Office of the European Union, 65pp, 2012.

FABRICIO, M. M.; BAÍA, J. L.; MELHADO, S. B. **Estudo de sequência de etapas do projeto na construção de edifícios: Cenário e perspectivas**: ENEGEP 2008 – 18º Encontro Nacional de Engenharia de produção, Niterói, Rio de Janeiro, 2008.

FABRICIO, M. M.; MELHADO, S. B. **Projeto simultâneo e qualidade na construção de edifícios**: Seminário Internacional de Arquitetura NUTAU – FAUUSP, São Paulo, 1998.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **Integrated life cycle assessment of concrete structures – state of the art report: fib Bulletin 71**, 66 p, 2013.

FIGUEIREDO, E. P. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto**: Geraldo C. Isaia (Editor), V. 2, pg. 829-855. IBRACON, 2005.

FIESP/CIESP. Indicadores de desempenho ambiental na indústria. 39 p., 2004. Disponível em <http://www.ciesp.com.br/pesquisas/indicadores-de-desempenho-ambiental-na-industria/> [acesso em 15.01.2016]

FINEP, PROGRAMA HABITARE, ITQC. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras**, 1998, 5 volumes. Disponível em <http://perdas.pcc.usp.br/> [acesso em 28/11/2012].

FORABOSCHI, P.; MERCANZIN, M.; TRABUCCO, D. **Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy**: Energy and Buildings, 68, 254-269, 2014.

FREITAS JR, J.A.; PARCHEN, C. F. A.; PRACHEN, M. F. R. **Importância do concreto na geração de CO₂ em um caso de obra de edifício**: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2010, IBRACON, 2010.

FUSCO, P. B.; **Tecnologia do Concreto Estrutural – Tópicos Aplicados**. p. 13, 179 pgs., Editora PINI, São Paulo, 2008.

GARCIA, D. B.; RODRIGUES, F. C.; AGUILAR, M. T. P. **Avaliação de Ciclo de Vida de um elemento estrutural pilar em aço x pilar em concreto armado**: 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida em produtos e Serviços, Florianópolis, 302-306, 2010.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Edição, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.

GIAMUSSO, S. E. **Orçamentos e custos na construção civil**. São Paulo, PINI, 1988.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. **Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa prática e ensino**: Ambiente Construído, v.6, n.4, p. 51-81, out/dez, 2006..

GRIGOLETTI, G. C.; SATTTLER, M.A. **Aplicação da ferramenta BEES 3.0 na avaliação de impactos ambientais da produção de aço no RS**: In. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, São Paulo. Anais. São Paulo, 2004. Disponível em <<http://www.infohab.org.br>>.

GUGGEMOS, A., HORVATH, A., **Comparison of Environmental Effects of Steel and Concrete-Framed Buildings**: Journal of Infrastructures Systems, 11(2), 93-101, 2005.

GUINÉE J. B.; **Life Cycle Assessment: past, present and future**: International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10-12, Nantes, France, 2012.

GURSEL, A. P.; MASANET, E.; HORVATH, A.; STADEL, A. **Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review**: Cement and Concrete Composites, 51, 38–48, 2014.

HABERT, G.; ARRIBE, D.; DEHOVE, T.; ESPINASSE, L.; LE ROY, R.. **Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges**: Journal of Cleaner Production, vol. 35, 250-262, 2012.

HÁJEK, P.; FIALA, C.; KYNCLOVÁ, M. **Life Cycle assessments of concrete structures – a step towards environmental savings**: Structural Concrete, vol. 12, Issue 1, 13-22, 2011.

HASELBACH, L.; **Potential for Carbon Dioxide Absorption in Concrete**: Journal of Environmental Engineering, 135 (6): pg. 465-472, ASCE, 2009.

HAUSCHILD, M. Z.; POTTING, J. **Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP 2003 methodology**: Guidelines from Danish environmental protection agency, Environmental News, 80, Copenhagen, Dinamarca, 2005.

HEED, P. V.; BELIE, D. **Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations**: Cement and Concrete Composites, 34, 431–442, 2012.

HELENE, P.; **40 Perguntas – Materiais, componentes e sistemas construtivos**: Revista Técnica, nº 162, PINI, agosto, 2011.

HELENE, P. R. L., **Corrosão em armaduras para concreto armado**: São Paulo, PINI/ IPT, 1986.

HENRY, J-F; JOURNEAULT, M. **Environmental performance indicators: AN empirical study of Canadian manufacturing firms**: Journal of Environmental Management, 87, nº 1, 165-176-2008.

HOLCIM Brasil S.A.- **Declaração Ambiental do produto: Cimento CP II 40 RS**, 2011.

HOOTN, R. D.; BICKLEY, J. A. **Design for durability: The key to improving concrete sustainability**: Construction and Building Materials, 67, 422-430, 2014.

HORVÁTHOVÁ, E. **Does environmental performance affect financial performance? A meta-analysis**: Ecological Economics, 70 (1), 52-59, 2010.

HORVÁTHOVÁ, E. **The impact of environmental performance on firm performance: Short-term costs and long-term benefits**: Ecological Economics, 84, 91-97, 2012.

IAB – INSTITUTO AÇO DO BRASIL. **Sustentabilidade – Reciclagem**.

Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/reciclagem.asp> acesso [02.06.16].

IAB – INSTITUTO AÇO DO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2013**, 93 pgs, Rio de Janeiro, 2013.

IAB – INSTITUTO AÇO DO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2014**, 49 pgs, Rio de Janeiro, 2014.

IT-06 (INSTRUÇÃO TÉCNICA – 06) - Segurança Estrutural das Edificações. Corpo e Bombeiros Militar, 11p. , Julho, 2005.

ISO TR 14049. **Technical report - analyse du cycle de vie: exemples d'application de l'ISO 14040 traitant de la définition de l'objectif et du champ d'étude de l'inventaire**: Genebra, Suíça, 45 p., 2000.

ISO TS 14048. **Technical specification – LCA: data documentation format**: Genebra, Suíça, 40 p., 2002.

ISO TR 14047. **Technical report environmental management - Life cycle impact assessment: examples of application of ISO 14042**. Genebra, Suíça, 87 p., 2003

IWATA, H.; OKADA, K. **How does environmental performance affect financial performance? Evidence from Japanese manufacturing firms**: Ecological Economics, 70, 1691-1700, 2011.

JOHANSSON, G., **Success factors for integration of ecodesign in product development – A review of the state of the art:** Environmental Management and Health, Vol 13, 1, 98-107, MCB UP Limited, 2002.

Joint Research Centre of the European Commission, **ILCD handbook – International reference Life Cycle Data System- General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance.** Publications Office of the European Union, 394 p., 2010.

Joint Research Centre of the European Commission, **ILCD handbook – International reference Life Cycle Data System- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context – based on existing environmental impact assessment models and factors.** Publications Office of the European Union, 145 p., 2011.

John V. M., PUNHAGUI K. R. G., CAMPOS E. F., **Emissão de CO2 do transporte da madeira nativa da Amazônia:** Ambiente Construído, Vol 11, nº 2, p. 157-172, Associação Nacional do Ambiente Construído, 2011.

JOHN V. M.; DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S. **Measuring the eco-efficiency of cement use:** Cement & Concrete Composites, 32, 555-562, 2010.

JUNNILA, S.; HORVATH, A.; GUGGEMOS A. A. **Life-cycle assessment of office buildings in Europe and the United States:** Journal of Infrastructure System, 12(1), 10-17, 2006.

KARSREEN, M. M.; BANFILL, P. F. G.; MENZIES, G. F. **Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A review:** Sustainability, 1, pg. 674-701, 2009.

KARSTENSEN, K. H.; **Formação e Emissão de POPs pela Indústria de Cimento, Fundação para a Pesquisa Científica e Industrial da Noruega:** World Business Council for Sustainable Development – Cement Sustainable Initiative [Edição Brasileira Fundação Christiano Ottoni (FOC)/ Universidade federal de Minas Gerais (UFMG)], 2006.

KENJI, K. **Aplication of performance-based environmental design to concrete and concrete structures:** Structural Concrete, vol. 12 n. 1: pg. 30-35, 2011.

KELLEMBERGER, D.; ALTHAUS, H-J. **Relevance of simplifications in LCA of building components:** Building and Environment, 44, 818-825, 2009.

KJELSEN, K. O.; GUIMARÃES, M.; NILSSON, A. **The CO₂ life balance of concrete in a life cycle perspective**: Nordic Innovation Centre, Oslo, Norway, 2005.

KRONKA, R. C., **Arquitetura, Sustentabilidade e Meio Ambiente**: II Encontro nacional e I Encontro latino Americano sobre edificações e comunidades sustentáveis, Canela, RS, Abril, 2001.

KUHN, E. A., **Avaliação Ambiental do protótipo de Habitação de Interesse Social Alvorada**: 2006. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

LEEK, D. S.; POOLE, A.B. **The breakdown of passive film on high yield mild steel by chloride ions**: In: PAGE, C. L.; TREADAWAY, K. W. J; BAMFORTH, P. B., eds Corrosion of reinforcement in concrete. London, Society of Chemical Industry/ Elsevier Applied Science, p. 65-73, 1990.

LEVY, S.; **Sustentabilidade na Construção Civil: A Contribuição do Concreto**: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações, Geraldo C. Isaia (Editor), p. 1551-1579, IBRACON, 2005.

LIBRELOTTO, D.; JAVALI, S. **Aplicação de uma ferramenta de Análise de Ciclo de Vida em edificações residenciais – Estudos de caso**: Engenharia Civil, 30, 5-20, 2008.

MACEDO, D. B. G., **Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida de Sistemas Construtivos – Aplicação em um Sistema Estruturado em Aço**: Tese Doutorado UFMG – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, 2011.

MATEUS, R.; BRAGANÇA, L. **Life-Cycle assessment of residencial buildings**: International Conference Sustainability of constructions – Towards a better built environment, COST Action C25 – Final Conference, 255-262, 2011. Disponível em http://www.civil.uminho.pt/lftc/C25_Proceedings_Final_Conference_2011.pdf. Acesso em [04.08.2015].

MALHOTRA, V. M. ; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials. Advances in Concrete Technology**: Gordon and Breach Publishers, V.1, 1996.

MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases do efeito estufa 2009**. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0207/207624.pdf. Acesso em [03.05.2016]

MENDES, N. C., **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**: Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2013.

MEHTA, P. K.; **Reducing the Environmental Impact of Concrete**: Concrete International, 61-66, Outubro/2001.

MEHTA, P. K., **Concrete International**, vol 24., n.7, pp. 23-28, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**, 3ª Edição, IBRACON, 2008.

MICHELLIS Jr., D.; **Crônicas da Sustentabilidade**, 2011, 2ª edição, 253 páginas, disponível em: <http://ie.org.br/site/ieadm/arquivos/argnot5426.pdf>. Acesso em [25.03.2014].

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M.; OSTERTAG, C. P. **Greenhouse gas emissions from concrete can be reduce by using mix proportions, geometric aspects, and age as a design factors**: Environmental Research Letters, 10, 1-12, 2015.

MIRZA, M.; XIAORONG, Wu; YIXIN, S. **CO₂ sequestration using calcium-silicate concrete**: Canadian Journal of Civil Engineering, n. 33, 776-784, 2006.

MME -MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL – SGN). **Relatório Técnico 58 – Perfil do Aço**, 40 pgs., AGOSTO, 2009.

MORANVILLE-REGOURD, M. **Cements made from blastfurnace Sla**: LEA's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, Edited by Peter C. Hewlett, Elsevier Science and technology Books, 2004.

MULLER, H. S.; HAIST, M.; VOGUEL, M. **Assessment of the sustainability potential of concrete and the concrete and structures considering their environmental impact, performance and lifetime**: Construction and Building Materials, 67, 321–337, 2014.

NAZAR, Nilton; **Formas e escoramentos para edifícios: critérios para dimensionamento e escolha do sistema**. São Paulo, PINI, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**, 2ª Edição, São Paulo, PINI, 828 p.1997.

NIELSEN, C.V. **Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective:** Proceedings of NRMCA 2008 Concrete Technology Forum, 1-14, 2008.

OCHOA, L. H.; HENDRICKSON, C.; MATTHEWS, H.S.. **Economic input-output life-cycle assessment of U.S. residential buildings:** Journal of Infrastructure Systems, 8(4), 132-138, 2002.

NIELSEN, C. V.; GLAVIND, M. **Danish experiences with a decade of green concrete:** Journal Advanced Concrete Technology, 591), 3-12, 2007.

OECD, **Glossary of Statistical Terms, Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods,** Series F, No. 67, United Nations, New York, 1997. Disponível em <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=1829>. Acesso [15.07.2016].

OLIVEIRA, A.S. **Análise Ambiental da Viabilidade da Seleção de Produtos da Construção Civil através do ACV e do Software BEES 3.0**Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 118 p., 2007.

OLLIVIER, J-P; VICHOT A. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** Tradução: CASCUDO, O.; CARASEK H., São Paulo, IBRACON, 2014.

ORTEGA, P.; **The Contribution of admistures in sustainable concrete construction:** Concrete for a sustainable future, Annual Technical Symposium, , The Institute of Concrete Technology, UK, March, 2006.

ORTIZ, O; CASTELLS, F. e SONNEMANN, G. **Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA.** Construction ans Building Materials: 23, p. 28-39, 2009.

PADILHA, S. A.; SILVA FILHO, L. C. P.; TORRES, A. S. **Corrosão de armaduras por íons cloretos: uma revisão dos estudos brasileiros:** Revista Concreto & Construções, IBRACON, p. 66 – 72, n. 65, 2012.

PALEARI, M.; CAMPIOLI, A.; LAVAGNA, M. **Life Cycle Assessment of building structure:** Proceedings of the Final Conference Sustainability of Constructions - Towards a better built environment, Innsbruck,2011.

PARK, J.; TAE, S.; KIM, T.. **Life Cycle CO₂ assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea**: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2940-2946, 2012.

PAYA, I.; YEPES, V.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F.; HOSPITALER, A. **Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing**: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 23, 596-610, 2008.

PAYA, I.; YEPES, V.; GONZÁLEZ-VIDOSA, F.; HOSPITALER, A, GONZÁLEZ-VIDOSA, F. **CO₂ optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing**: Engineering Structures, 31, 1501-1508, 2009.

PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY EXTENSION, Renewable and Alternative Energy. Disponível em <http://extension.psu.edu/natural-resources/energy/what>, acesso [15.07.2016].

PEURIFOY, E. G. R.; OBERLENDER, G. D. **Formwork for concrete structures**. New York: Mcgraw-Hill, 3rd ed., 1995.

PEYROTEO, A.; CARVALHO, C.; JAVALI, S. **Avaliação Ambiental comparativa de estruturas metálicas e de estruturas de betão armado**: Simpósio Ibero-Americano “O Betão nas Estruturas” – SIABE 05, Coimbra, Actas, 129-136, 2005.

PINHEIRO, M; A., **Análise estrutural de edificações de pequeno porte – estudo de caso** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, USP – São Carlos, 147p., 2008.

PINHEIRO. M. A.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.; PINHEIRO, L. M.; FERRIANI, H. F.; FALCUCCI, R. A.; FERRIANI, M.A. **Influência da Alvenaria no projeto de estruturas de pequeno porte**: 51CBC 0277, IBRACON, Curitiba - PR, Outubro/ 2009.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Dissertação (Especialização em Avaliação e Perícia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 191 p., 2006.

POURBAIX, M. **Curso sobre corrosão eletroquímica**. Instituto Nacional de Investigação Industrial, Lisboa, 90p., 1961.

PORRERO, J. L. **Causas que em la pratica producen la corrosión de las armaduras de concreto:** Boletín Del IMME, Caracas, 12 (49): 25-49, 1975.

PORTER, M. E. **America's green Strategy.** *Scientific American*. 264(4), April 1991, 2005. A competitividade das nações. Rio de Janeiro, Campus, 1990

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. **Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship:** *Journal of Economic Perspectives*, Volume 9, number 4, 97-118, 1995.

Research Report R11-01. **Methods, Impacts, and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle:** Department of Civil and Environmental Engineering, Concrete Sustainable Hub, Massachusetts Institute of Technology, august, 2011.

ROSSI, E. **Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso,** 131 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Urbana) - UFSCar, 2013.

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; GOMES, V.; MOURA, F. **Indicadores ambientais de ciclo de vida aplicados a concretos com diferentes tipos de cimentos e resistências características:** Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2013, Gramado, 2013.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; GLASSER, F. P. **Analysis of the steel: concrete interface:** In: PAGE, C. L.; TREADAWAY, K. W. J.; BAMFORTH, P. B., eds. *Corrosion of reinforcement in concrete*. London, Society of Chemical Industry/ Elsevier Applied Science, p. 74-86, 1990.

SCHALTEGGER, s., *Two Paths, LCA – Quo Vadis?*, Editora Birkhauser, 168p, 1996.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura:** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

SCHOKKER, A. J.; **The Sustainable Concrete Guide – Strategies and Examples.** U.S. Green Concrete Council, 86 p, Second Edition, 2010.

SILVA, A.; ISAIA, G., FORNEL, G.; FELICE JR., J. **Sustentabilidade de um pilar de concreto armado, em função da desmaterialização por aumento de resistência característica:** Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2013, Gramado, 2013.

SILVA, V. G. **Uso de Materiais e Sustentabilidade**: Revista Sistemas Prediais (Online), julho, 2007. Disponível em <<http://www.nteditorial.com.br/revista/Materias/index.asp?RevistaID1=7&Edicao=22&id=200&TopicoID=318>>. Acessado em: 11.ago.2011.

SILVA, V.G.; M.G. JOHN; AGOPYAN, V.; **Agenda 21 Uma Proposta de Discussão para o Construbusiness Brasileiro**: ANTAC – Encontro Nacional e I Encontro latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Canela, Abril, 2001.

SINAPI (Sistema Nacional de Custos e Índices da Construção Civil)– Caixa Econômica Federal/IBGE. **Custo de Composições Sintéticos**. Maio/2016.

SISTEMA AMBIENTAL PAULISTA - GOVERNO DE SP. Madeira legal vs. madeira ilegal. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/madeiralegal/madeira-legal-vs-madeira-ilegal/>. Acesso em 08.out.2016.

SOARES, S. R.; PEREIRA, S. W. **Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida**: Ambiente Construído: Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 83-94, abr./jun., 2004.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M.; PEREIRA, S. W. **Avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil**: Coletânea Habitare - vol. 7 - Construção e Meio Ambiente. Porto Alegre, 2006.

SUMNER M.; GIANETTI G. E BENINI H. **A Indústria do Cimento e Seu Papel na Redução das Emissões de CO₂**: Grace Construction Products, Revista CONCRETO& Construções – n. 51, p. 65-70, jul. ago. e set. /2008.

TAE, S.; BAEK, C.; SHIN, S. **Life Cycle CO₂ evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete**: Environmental Impact Assessment Review, n. 31, 87, 253-260, 2011.

TANIGUTI, E.; FRIGIERI, V.; SILVA, C. O.; RODRIGUES, H.; **Panorama e perspectivas do concreto no Brasil**: Revista Concreto & Construções, n° 72, pg. 69 - 73, IBRACON, Out – Nov, 2013.

TÉCHNE. Sobras que valem uma obra. Edição 55, outubro, 2001. Disponível em <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/55/artigo285211-1.aspx> acesso em [25.01.2016].

TORGAL, F. P.; JALALI, S.; **Construção Sustentável. O caso dos materiais de construção**: Congresso Construção - 3° Congresso Nacional, Coimbra, Portugal, 2007.

UECHI, M. E.; PAULA, N.; MOURA, N. C. S.; **Projeto integrado de edifícios – análise da postura dos profissionais de projeto**: Simpósio Brasileiro de Qualidade do projeto no Ambiente Construído – Encontro Brasileiro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, Campinas, 2013.

UEN-EM 197-1:2011 – **Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cement**, 2011.

VALVERDE, F.M.; **Agregados para a construção civil**. Balanço Mineral Brasileiro 2001, 15p., 2001.

VITRUVIUS, P. **Tratado de Arquitetura**. Tradução: M. Justino Maciel. São Paulo, Martins Fontes, 2007

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT; **Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emissions reductions up to 2050**, 2009.

VENTURA, A.; **Life Cycle Assessment, in-between Research, standards, regulations and application**: International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, July 10-12, Nantes, France, 2012.

VERBEECK, G.; HENS, H. **Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis. Building and Environment**: Volume 45, Issue 4. Abril, 2010. WORLDSTEEL ASSOCIATION, Steel's contribution to a low carbon future, Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/climatechange/?page=2&subpage=1>>. Acessado em 07/09/2011.

WALLS, J. L.; BERRONE, P.; PHAN, P. H. **Corporate Governace and environmental performance: is there really a link?**: Strategic Management Journal, 87, 33, 885-913, 2012.

WEITZMAN, M.L. **On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change**: The Review of Economics and Statistics, Vol 91(1), 1-19, Fevereiro, 2009.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products**: Bonton/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publisehrs. v.1., 1997.

WORLDSTEEL ASSOCIATION, **Steel's Contribution to a Low Carbon Future – Worldsteel position paper**: Disponível em: <http://www.worldsteel.org/climatechange>. Acesso em [01.09.2011].

WU, P.; XIA, B.; ZHAO, X. **The importance of use and end-of-life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete – A review**: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 306-369, 2014.

YANG, F. **Integrating Life Cycle and carbon Assessmens: What Life Cycle Assessment can teach structural engineers about design and specification**: Structures Congress ASCE, 2011.

YIXIN, S; XIAORONG, Wu; MIRZA, M.; **CO2 sequestration using calcium-silicate concrete**: Canadian Journal of Civil Engineering, n. 33: pg. 776-784, 2006.

ZORZI, A. C. **Sistemas de formas para edifícios: Recomendações para a melhoria da qualidade e da produtividade com redução de custos**. 2ª edição, 193 pg., IBRACON, 2015.

12) ANEXOS

12.1) Fontes de dados do GaBi utilizadas na ACV.

Descrição	Processo	Nacionalidade	Ano de referência	Comentário
Cadeia de produção da eletricidade	<i>BR: Power grid mix PE</i>	Brasil	2002	Este processo foi utilizado na modelagem da cadeia de produção da brita e na manufatura do concreto. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml-data/processes/a4a2888f-44e6-4e7f-934c-2b9a7e19d38f.xml
Cadeia de extração e beneficiamento da água	<i>EU-27: Tap water PE</i>	Europa	2013	Este processo foi utilizado na modelagem da cadeia de produção da brita, areia e na manufatura do concreto. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml-data/processes/db009014-338f-11dd-bd11-0800200c9a66.xml
Cadeia de produção do nitrato de amônio	<i>EU-27: Ammonium nitrate PE</i>	Europa	2012	Este processo foi utilizado na modelagem da cadeia de produção da brita. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-software.com/xml-data/processes/8309f06b-8971-43f6-8987-1cfffcc60055.xml
Cadeia de produção do cimento	<i>BR: Cement (average)</i>	Brasil	2013	Este processo foi utilizado na modelagem da cadeia de produção do cimento. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-software.com/xml-data/processes/7853a499-87af-4a56-80b3-da30563ca2c3.xml
Cadeia de produção do aço	<i>GLO: Steel rebar (worldsteel)</i>	Global	2007	Este processo foi utilizado na modelagem da cadeia de produção do aço. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-software.com/xml-data/processes/268a11fb-baf2-4b9e-8867-38bea0e76ef6.xml
Cadeia de produção da madeira	<i>BR: wood (eucalyptus ssp)</i>	Brasil	2012	Este processo foi utilizado na modelagem da cadeia de produção da madeira. Detalhes da documentação em SILVA (2012). http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/td-e-31072012-121351/pt-br.php
Deposição final da construção	<i>EU-27: Landfill for inert matter (Unspecific construction waste)</i>	Europa	2013	Este processo foi utilizado na modelagem do fim de vida da construção. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-software.com/xml-data/processes/68b5b6e9-290b-47c7-a1fa-465588d81906.xml
Caminhão tanque	<i>US: Truck - Tank, dry bulk / 50,000 lb payload - 8b</i>	Estados Unidos	2013	Este processo foi utilizado para o transporte do cimento. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-software.com/xml-data/processes/6f6f19ec-b417-48bd-a0eb-9006076efb5d.xml
Caminhão	<i>GLO: truck-trailer PE</i>	Global	2013	Este processo foi utilizado para o transporte da brita, areia, aço, madeira, concreto, e resíduos da demolição da construção. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-software.com/xml-data/processes/18bf9ccd-95a0-41f2-a8ec-33c728fd824f.xml
Diesel	<i>BR: Diesel at refinery PE</i>	Brasil	2011	Este processo foi utilizado para todos os processos de transporte envolvendo caminhões. Detalhes da documentação do processo em: http://gabi-software.com/xml-data/processes/7155a643-f4e6-4a42-8163-f18acf7c5f2b.xml