



**FLÁVIA RUSCHI MENDES DE OLIVEIRA**

**INTEGRAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO  
TÉCNICO-FUNCIONAL, AMBIENTAL E ECONÔMICO  
DE SISTEMAS ESTRUTURAIS VERTICAIS EM  
CONCRETO**

**CAMPINAS  
2013**





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**FLÁVIA RUSCHI MENDES DE OLIVEIRA**

**INTEGRAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO  
TÉCNICO-FUNCIONAL, AMBIENTAL E ECONÔMICO DE  
SISTEMAS ESTRUTURAIS VERTICAIS EM CONCRETO**

Orientadora: Prof (a) Dr (a) Vanessa Gomes da Silva

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil. Área de Concentração: Arquitetura e Construção

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA FLÁVIA RUSCHI MENDES DE OLIVEIRA E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. VANESSA GOMES DA SILVA

---

Assinatura do Orientador

**CAMPINAS  
2013**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

OL4i Oliveira, Flávia Ruschi Mendes de, 1957-  
Integração de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico de sistemas estruturais verticais em concreto / Flávia Ruschi Mendes de Oliveira. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Vanessa Gomes da Silva.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Indicadores de desempenho. 2. Sustentabilidade. 3. Concreto armado. 4. Concreto protendido. 5. Avaliação do ciclo de vida. 6. Custo do ciclo de vida. I. Silva, Vanessa Gomes da, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Integration of technical-functional, environmental and economic performance indicators of concrete vertical structural systems

**Palavras-chave em inglês:**

Performance indicators

Sustainability

Reinforced Concrete

Prestressed concrete

Life cycle analysis

Life cycle costs

**Área de concentração:** Arquitetura e Construção

**Titulação:** Doutora em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Vanessa Gomes [Orientador]

Gladis Camarini

Armando Lopes Moreno junior

Cassia Maria Lie Ugaya

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

**Data de defesa:** 11-12-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

INTEGRAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO TÉCNICO-  
FUNCIONAL, AMBIENTAL E ECONÔMICO DE SISTEMAS  
ESTRUTURAIS VERTICAIS EM CONCRETO

Flávia Ruschi Mendes de Oliveira

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Vanessa Gomes/FEC-Unicamp  
Presidente e Orientadora/UNICAMP



Prof. Dr. Gláucia Camarini  
UNICAMP



Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior  
UNICAMP



Prof. Dr. Cassia Maria de Uzeda  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Campinas, 11 de dezembro de 2013



## **RESUMO**

Pesquisas sobre novas gerações de sistemas de avaliação de edificações sugerem que o nível de sustentabilidade seja sempre avaliado por indicadores. Estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV) apontam o sistema estrutural como um dos principais contribuintes para as cargas ambientais de uma edificação. Não obstante, as estruturas têm recebido atenção insuficiente nestes sistemas de avaliação. No setor de construção civil brasileiro, onde predominam edificações em concreto, dados de avaliação integrada de desempenho ambiental, econômico e social no ciclo de vida das edificações ou de seus subsistemas são, praticamente, inexistentes. Este trabalho teve por objetivo demonstrar a hipótese de que *um conjunto de indicadores é capaz de integrar aspectos fundamentais de sustentabilidade à tomada de decisão e diferenciar alternativas de sistema estrutural em concreto por seu desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico no ciclo de vida da edificação*. Critérios definidos com base na literatura filtraram uma lista preliminar de indicadores técnico-funcionais. ACVs do berço ao portão utilizando o software *SimaPro 7.3* embasaram o cálculo de indicadores ambientais. Previsões da vida útil (VUe) e estimativas do custo do ciclo de vida (CCV) foram obtidas com o software *Life-365 v.2.1.1*. Para garantir 50 anos de vida útil de projeto (VUP) e atender ao requisito de durabilidade da ABNT NBR 15575:2013, a VUe foi corrigida por um programa de reparos. Indicadores técnico-funcionais foram calculados com base nas pranchas de projeto estrutural. Processo de análise hierárquica foi usado para definir sua importância relativa. Para a dimensão ambiental, adaptou-se a ponderação hierárquica do sistema de avaliação de impactos *EcoIndicator 99*. Uma ponderação igualitária foi usada nas duas dimensões para análise de sensibilidade. Cenários de importância relativa entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica foram predefinidos para ilustrar potenciais perspectivas de diferentes partes interessadas. Essa estrutura de indicadores e cenários de ponderação foi aplicada a 31 estudos de caso de tipologia vertical em concreto armado e protendido, em ambiente marinho do sudeste brasileiro. Resultados *demonstraram a veracidade da hipótese*, confirmando (i) que os indicadores mostram diferenças entre as estruturas, tanto no pavimento-tipo quanto na superestrutura, bem como, entre sistemas em concreto armado e protendido, e para os cenários propostos, as estruturas em laje protendida apresentaram desempenho global superior ao das estruturas em concreto armado, exceto quando se privilegia a dimensão ambiental, em que se observa o melhor desempenho desta última; (ii) não haver diferença entre as tipologias residencial e comercial para a finalidade desse estudo; (iii) a validade de considerar o pavimento-tipo representativo da superestrutura para o cálculo dos

indicadores, exceto para os ambientais; (iv) haver uma correlação linear significativa entre os indicadores *espessura equivalente* e *densidade de pilares* com o número de pavimentos; e (v) que a unidade funcional –  $m^2_{\text{área estrutural}}$  de uso residencial e comercial e VUP de 50 anos – consegue capturar aspectos de durabilidade e função estrutural, aliada à facilidade em coletar dados nos escritórios de projeto, e realizar análises comparativas entre diferentes estruturas de edificações de mesma tipologia.

*Palavras-chave:* indicador de desempenho; sustentabilidade; sistema estrutural; concreto armado; concreto protendido; ACV; CCV.



## **ABSTRACT**

Research initiatives for next generation assessment protocols state that buildings sustainability should always be described and assessed with the help of relevant indicators. Life cycle-based studies show the structural system as one of the major contributors to buildings environmental loads. However, structural systems have not gained enough attention in the sustainability/environmental buildings assessment systems so far. Data on integrated sustainability performance of building parts completely lack in the Brazilian building sector where concrete structures predominate. This study aims at checking the hypothesis that *a set of indicators can integrate key aspects of sustainability in design decision-making and differentiate concrete structural system's alternatives by their technical-functional, environmental and economic performances in the building life cycle*. Data for computing the technical-functional indicators were extracted from structural design drawings and calculation sheets provided by the responsible structural design practices. SimaPro 7.3 life cycle assessment (LCA) platform supported calculation of environmental indicators. Life cycle costs (LCC) and service life (SL) were estimated by Life-365 v.2.1.1 software. In order to reach the Brazilian standard durability requirement, SL was corrected through adoption of a repair program. Analytic hierarchy process was applied to define relative importance of technical-functional indicators. An adaptation of the life-cycle impact analysis method Eco-indicator 99 was used for weighting environmental indicators. Simulating different stakeholders perspectives, weighting scenarios among the technical-functional, environmental and economic performances were defined to streamline identification of a top performing solution. This framework of performance indicators and weighting scenarios were applied to thirty-one case studies of residential and commercial vertical buildings in reinforced and prestressed concrete in a southeast Brazilian marine environment. Results *demonstrated the veracity of the hypothesis*, confirming that (i) indicators were successful in showing structural systems' differences, both at typical floor and superstructure level, as well as between reinforced and prestressed concrete structures. For the proposed scenarios, the overall performance of prestressed structures exceeded all reinforced concrete structures' overall performance, except when it favors the environmental dimension, where the best performance of the latter is observed; (ii) there is no difference between commercial and residential typologies for the purpose of this study; (iii) a typical floor is representative of the whole superstructure for calculating technical-functional and economic performance indicators, but not for environmental indicators; (iv) there is a significant correlation between the indicators *equivalent thickness* and

*density of columns* with the number of building floors; (*v*) the functional unit –  $m^2_{\text{structural area}}$  for residential and commercial live loads for 50 years design life (DL) – can capture aspects of durability and structural function, with the ease of collecting data in design offices, and performing comparative analyzes between different building structures of the same type. Additionally, for such analysis, the results show (*vi*) that more information and standardized presentation of quantitative data are needed in structural design drawings to facilitate data collection for indicators' calculation.

*Keywords:* performance indicators; sustainability; structural systems; reinforced concrete; prestressed concrete; LCA; LCC.

## **SUMÁRIO EXECUTIVO**

Metodologias para seleção de indicadores são fundamentais nas estratégias para alcance da sustentabilidade no setor de construção civil. Uma avaliação completa da sustentabilidade de edificações deve englobar as dimensões ambiental, econômica e social, além da técnico-funcional. Entretanto, no setor de construção civil brasileiro, onde predominam as edificações em concreto, dados de avaliação integrada de desempenho ambiental, econômico e social no ciclo de vida das edificações ou de seus subsistemas são, praticamente, inexistentes.

Conseqüentemente, a abordagem atual típica para seleção dos sistemas estruturais de edificações brasileiras encontra-se desalinhada da tendência mundial para a sustentabilidade, limitando-se, praticamente, à consideração de atendimento ao requisito de segurança estrutural, custos iniciais e tempo de execução.

Outra questão relevante a respeito da sustentabilidade é a durabilidade, que influencia decisivamente a vida útil (VU) das edificações, definida pela vida útil do seu sistema estrutural. Contudo, vida útil, durabilidade e o papel desempenhado pelos sistemas estruturais não têm recebido atenção suficiente nos sistemas de avaliação de sustentabilidade de edificações.

Esse trabalho teve como objetivo demonstrar a hipótese de que, *um conjunto de indicadores é capaz de integrar aspectos fundamentais de sustentabilidade à tomada de decisão e diferenciar alternativas de sistema estrutural em concreto por seu desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico no ciclo de vida da edificação.*

Um conjunto de indicadores relevantes e mensuráveis foi proposto com base nas Normas de desempenho, ISO 6240:1980, ISO 6241:1984, ISO 9699:1994 e ABNT NBR 15575:2013, abrangendo requisitos em que o sistema estrutural exerça papel preponderante no seu atendimento, tais como, segurança, adaptabilidade ao uso, economia, construtibilidade, durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental.

Em seu estado atual, a ABNT NBR 15575:2013 não provê suporte à especificação de indicadores de desempenho ambiental. Esta limitação foi contornada pelo emprego de referências da literatura científica e normatização internacionais. Os indicadores ambientais propostos seguiram as diretrizes da EN 15643-2:2011 para descrever desempenho em relação a aspectos ambientais e a impactos deles resultantes, e incluem métricas de ciclo de vida que vêm sendo consistentemente incluídas em EPDs na Europa, regulamentadas pela EN 15804:2012.

Filtrado por critérios de seleção de indicadores definidos com base na literatura, o conjunto de indicadores técnico-funcionais, somado ao elenco de indicadores ambientais e ao indicador econômico – custo do ciclo de vida (CCV) foram aplicados a trinta e um sistemas estruturais em concreto armado e protendido de edificações residenciais e comerciais, verticais, situadas em regiões litorâneas brasileiras, preponderantemente, Vitória, ES. A validação destes indicadores foi iniciada no nível de elemento estrutural (pilares) e prosseguiu para sistemas de lajes e superestrutura completa. Os estudos de caso realizados *demonstraram a veracidade da hipótese*.

O cálculo dos indicadores ambientais para os materiais utilizados nos sistemas estruturais teve o suporte do software *SimaPro 7.3* na obtenção das ACV do berço ao portão (*cradle to gate*). Previsões da vida útil e estimativas do custo do ciclo de vida (CCV) foram obtidas com o software *Life-365 v.2.1.1*. Quantitativos de materiais e estimativas da mão de obra foram extraídos, respectivamente, dos projetos estruturais e tabelas de custos referenciais (fevereiro/2013) do LABOR<sup>1</sup>. Os indicadores técnico-funcionais foram calculados com base nas pranchas de projeto estrutural das edificações. Os parâmetros de equivalência funcional adotados foram: 50 anos de VUP, exposição a ambiente marinho e principais requisitos funcionais para tipologia vertical, residencial e comercial.

Os resultados de todos os indicadores foram normalizados em relação a um dos sistemas estruturais (Edificação X), e ponderados para possibilitar sua agregação em um resultado único. Foi utilizado o processo de análise hierárquica, com consulta a painel de especialistas em estruturas e construção civil para ponderação dos indicadores técnico-funcionais. Diante da dificuldade encontrada para formar um painel de especialistas capaz de definir a ponderação entre os indicadores ambientais para sistemas estruturais, foi adaptada a ponderação hierárquica do sistema de avaliação de impactos *Eco-indicator 99*.

Em síntese, estes resultados confirmaram:

- (i) que os indicadores são capazes de mostrar diferenças entre as estruturas, tanto no pavimento-tipo quanto na superestrutura, bem como, entre sistemas em concreto armado e protendido. Nas condições do estudo e cenários de cada dimensão, os sistemas estruturais em concreto protendido apresentaram desempenho global superior ao das estruturas em concreto armado, exceto para o cenário G3, que privilegiando significativamente a dimensão ambiental, apontou o melhor desempenho da estrutura em concreto armado da Ed.A.

---

<sup>1</sup> Laboratório de custos e orçamentos de construção da Universidade Federal do Espírito Santo. Tabelas disponíveis em (<http://siteiopes.no-ip.info/>).

- (ii) não haver diferença entre as tipologias residencial e comercial para a finalidade desse estudo;
- (iii) a validade de se considerar o pavimento-tipo representativo da superestrutura para o cálculo dos indicadores, exceto para os ambientais;
- (iv) haver uma correlação linear significativa entre os indicadores *espessura equivalente e densidade de pilares* com o número de pavimentos;
- (v) que a unidade funcional –  $m^2_{\text{área estrutural}}$  de carregamento para uso residencial e comercial em 50 anos de vida útil de projeto (VUP) – consegue capturar aspectos de durabilidade e função estrutural, aliada à facilidade em coletar dados nos escritórios de projeto, e realizar análises comparativas entre diferentes estruturas de edificações de mesma tipologia.

Adicionalmente, para análises desse tipo, os resultados evidenciaram:

- (vi) a necessidade de mais informação e uniformização da apresentação de quantitativos nas pranchas de projeto estrutural para coleta de dados para cálculo dos indicadores; e
- (vii) que um dos parâmetros de equivalência funcional – vida útil de projeto (VUP) – e o atendimento à ABNT NBR 15575:2013 no que tange ao requisito de durabilidade só foram assegurados com adoção de um programa de reparos.

As principais contribuições desta tese à comunidade técnica brasileira são a oferta de (i) um elenco de indicadores ambientais cuidadosa e sistematicamente selecionados e testados para uma amostra considerável de sistemas estruturais correntemente projetados no país, além de uma metodologia e critérios para sua agregação; e de (ii) valores iniciais de referência para os indicadores propostos, visando a balizar avaliações de sistemas estruturais durante o desenvolvimento de novos projetos.

Foram apresentados os perfis de desempenho dos trinta e um sistemas estruturais analisados, e os valores dos indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico, com sua descrição e método de cálculo embasado cientificamente, de acordo com diretrizes das EN 15643-2:2011 e EN 15804:2012 para a avaliação ambiental e da ISO 15686-5:2008 para avaliação do custo do ciclo de vida. Desta forma, são viabilizadas futuras comparações com resultados de outras pesquisas, e asseguradas sua rastreabilidade e replicabilidade em outras tipologias de sistema estrutural e/ou condições de exposição.



## **SUMÁRIO**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA</b>	<b>1</b>
1.1.1	O PAPEL DOS INDICADORES NA AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE	1
1.1.2	OS SISTEMAS DE AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO DE EDIFICAÇÕES (E SISTEMAS ESTRUTURAIS)	4
1.1.3	A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA ESTRUTURAL NO DESEMPENHO AMBIENTAL E ECONÔMICO DE EDIFICAÇÕES	7
<b>1.2</b>	<b>PRINCIPAIS CENTROS DE REFERÊNCIA E INICIATIVAS NO TEMA</b>	<b>9</b>
<b>1.3</b>	<b>FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE PARA PESQUISA</b>	<b>12</b>
<b>1.4</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>12</b>
1.4.1	OBJETIVO GERAL	12
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
<b>1.5</b>	<b>ESTRUTURA DA TESE</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>DESEMPENHO E INDICADORES DE DESEMPENHO FUNCIONAL</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>REQUISITOS DE DESEMPENHO DO SISTEMA ESTRUTURAL</b>	<b>20</b>
2.2.1	REQUISITOS DE DESEMPENHO CORRESPONDENTES ÀS EXIGÊNCIAS DO USUÁRIO QUANTO À SEGURANÇA	20
2.2.1.1	Segurança estrutural	20
2.2.1.2	Segurança contra incêndio	21
2.2.1.3	Segurança no uso e operação	22
2.2.2	REQUISITOS DE DESEMPENHO CORRESPONDENTES ÀS EXIGÊNCIAS DO USUÁRIO QUANTO À SUSTENTABILIDADE	22
2.2.2.1	Durabilidade	23
2.2.2.2	Manutenibilidade	27
2.2.2.3	Adequação ambiental	27
2.2.3	REQUISITO CORRESPONDENTE À EXIGÊNCIA DO USUÁRIO QUANTO À ECONOMIA	29
<b>2.3</b>	<b>INDICADORES DE DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL</b>	<b>29</b>
2.3.1	REQUISITO CORRESPONDENTE À EXIGÊNCIA DO USUÁRIO QUANTO À ADAPTAÇÃO AO USO	30
<b>2.4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS ESTRUTURAIS</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA COMO BASE PARA CÁLCULO DE INDICADORES AMBIENTAIS</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>INDICADORES AMBIENTAIS DE CICLO DE VIDA</b>	<b>40</b>
3.3.1	ENERGIA (PRIMÁRIA) INCORPORADA (EE)	41
3.3.2	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (EGWP) REPRESENTADO PELO CARBONO EQUIVALENTE INCORPORADO/EMBTIDO	43
3.3.3	INDICADORES DE CICLO DE VIDA EM DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTOS	45
3.3.4	PEGADA DE ÁGUA AZUL (bWF)	47
3.3.5	CONTEÚDO DE MATÉRIA-PRIMA NÃO RENOVÁVEL (NRC)	47
3.3.6	CONSUMO DE MATERIAIS (Mc)	48

<b>3.4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO</b>	<b>48</b>
<b>4 CUSTO DO CICLO DE VIDA COMO INDICADOR ECONÔMICO</b>		<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>O CUSTO NO CONTEXTO DA SUSTENTABILIDADE</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA</b>	<b>55</b>
<b>4.4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO</b>	<b>61</b>
<b>5 ABORDAGEM METODOLÓGICA</b>		<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>DESCRIÇÃO DAS TIPOLOGIAS CONSTRUTIVAS DOS ESTUDOS DE CASO</b>	<b>65</b>
5.2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO	66
<b>5.3</b>	<b>DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E COMPOSIÇÃO DE LISTA DE INDICADORES COM BASE EM REQUISITOS DE DESEMPENHO (ETAPA 1)</b>	<b>71</b>
5.3.1	CRITÉRIOS PARA COMPOSIÇÃO E SELEÇÃO DE INDICADORES	71
5.3.2	REQUISITOS DE DESEMPENHO ATRIBUÍDOS AO SISTEMA ESTRUTURAL	74
<b>5.4</b>	<b>VALIDAÇÃO (ETAPA 2)</b>	<b>78</b>
5.4.1	PRÉ-TESTE	78
5.4.2	VALIDAÇÃO FINAL	79
5.4.2.1	Equivalência funcional	79
5.4.2.2	Coleta de dados dos projetos e softwares de apoio utilizados no cálculo dos indicadores	80
5.4.2.3	Limites do sistema estabelecidos para cálculo dos indicadores	84
5.4.2.4	Modelo para previsão de vida útil utilizado	87
5.4.2.5	Entrada de dados no software Life-365 v.2.1.1 para estimar a vida útil	90
5.4.2.6	Cálculo dos indicadores de desempenho ambiental	91
5.4.2.6.1	Normalização dos perfis ambientais e sistema de ponderação adotado para os indicadores de desempenho ambiental	92
5.4.2.7	Cálculo do indicador de desempenho econômico - CCV	94
5.4.2.8	Cálculo dos indicadores de desempenho técnico-funcional	96
5.4.3	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	97
5.4.3.1	Teste de Wilcoxon Pareado	97
5.4.3.2	Teste de Mann-Whitney U	98
<b>5.5</b>	<b>PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA PARA PONDERAÇÃO ENTRE INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS (ETAPA 3)</b>	<b>99</b>
<b>5.6</b>	<b>CENÁRIOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS DIMENSÕES (ETAPA 4)</b>	<b>101</b>
<b>6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>		<b>103</b>
<b>6.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>103</b>
<b>6.2</b>	<b>COMPOSIÇÃO DE LISTA DE INDICADORES COM BASE EM REQUISITOS DE DESEMPENHO (ETAPA 1)</b>	<b>103</b>
<b>6.3</b>	<b>VALIDAÇÃO (ETAPA 2)</b>	<b>106</b>
6.3.1	INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS	106
6.3.1.1	Normalização dos indicadores técnico-funcionais	110



6.3.2	PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA PARA PONDERAÇÃO DOS INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS (ETAPA 3)	111
6.3.3	INDICADORES AMBIENTAIS	113
6.3.3.1	Estimativa da vida útil das lajes do pavimento-tipo das edificações	113
6.3.3.2	Análise de sensibilidade das estratégias para aumento da vida útil	115
6.3.3.3	Indicadores ambientais dos pavimentos-tipo	118
6.3.3.4	Indicadores ambientais da superestrutura	124
6.3.3.5	Ponderação dos indicadores ambientais	131
6.3.3.6	Equivalência de desempenho ambiental dos sistemas estruturais das tipologias comercial e residencial	138
6.3.4	INDICADOR ECONÔMICO: CUSTO DO CICLO DE VIDA	140
6.3.4.1	CCV calculado para o sistema estrutural dos pavimentos-tipo	140
<b>6.4</b>	<b>CENÁRIOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS DIMENSÕES (ETAPA 5)</b>	<b>144</b>
<b>6.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO</b>	<b>148</b>
6.5.1	RESUMO DOS RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO	151
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>153</b>
7.1	ASPECTOS A EXPLORAR EM PESQUISAS FUTURAS	156
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>159</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>179</b>
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>185</b>



## **DEDICATÓRIA**

Ao meu pai, Almir Mendes de Oliveira (*in memorian*), que com seu sonho de ter a única filha Doutora em Engenharia Civil foi, desde sempre, meu grande incentivador.

À minha mãe, Maria Teresinha (*in memorian*) que, antevendo as frequentes ausências do seu convívio, custou a aceitar minha decisão de enfrentar um doutoramento a essa altura da vida, e que, infelizmente, não pode compartilhar comigo a alegria da conclusão.

Ao meu marido, Fernando, que, mesmo não gostando muito da ideia, respeitou e prestigiou a minha decisão.

Às minhas filhas, Taissa e Marcella, que apoiaram, desde o início, a minha decisão de – dezesseis anos após concluir o Mestrado – interromper a rotina de ensino, pesquisa, extensão e administração dentro da Universidade e, por um período de quatro anos, passar de professora a aluna... Que a coragem e a determinação testemunhadas por elas, sirvam-lhes de estímulo à busca pela realização de seus próprios sonhos.



## **AGRADECIMENTOS**

À CAPES e CPFL Energia, pelos auxílios financeiros. Aos colegas do Departamento de Engenharia Civil da UFES que, absorvendo meus encargos, aprovaram meu afastamento.

A Vanessa Gomes da Silva, pelo privilégio de conviver e aprender com uma mente brilhante. Competência, agilidade e precisão nas críticas, além do jeito leve de ser, permearam sua orientação e foram fundamentais para o sucesso deste trabalho de doutorado.

A Maristela Gomes da Silva, que, além da amizade, coorientou com rigor científico e vasta experiência nas áreas de materiais – concreto – e metodologia de pesquisa, e cujas contribuições foram imprescindíveis ao desenvolvimento desta tese.

Aos membros das bancas examinadoras de Qualificação e Defesa, por suas valiosas sugestões.

A Roger Semblano de Castro e Marcelo Wagner Pereira, da VERTIKO Engenharia Estrutural, Carlos Augusto Calmon Nogueira da Gama, da MCA Estruturas, e José Pedro Zamborlini, da IBEZA Incorporadora e Construtora Ltda, por fornecerem os projetos estruturais e arquitetônicos que viabilizaram os estudos de caso, e participarem do painel de especialistas. A Alice Beleza Nascimento, Nélio e Maria Cristina Furlan, representando os demais especialistas participantes.

Muitos colaboraram provendo informações, revisando cálculos e texto. Ao Acley Gabriel da Silva Thomaz, agradeço por revisar planilhas e complementar dados de projetos. Ao Pedro Berger, pelo suporte no tratamento estatístico dos resultados. Ao Alexandre Amaral, da PTE – Pós Tensão Engenharia Ltda, pelos dados referentes às placas, cunhas e serviços de ancoragem dos aços de protensão. Ao Prof. Marco Antônio Barboza da Silva do LABOR – CTUFES, pela explanação sobre a construção das tabelas de custos. À ex-aluna e engenheira do IOPEs, Soraia Osório, por fornecer dados para outros estudos de caso.

Agradeço também, a Karla Conde, colega em todas as disciplinas cursadas, pela companhia nas idas semanais a Campinas. Ao Sr. Wanderley, fiel taxista, responsável pelos nossos traslados UNICAMP – VCP – UNICAMP que, contando estórias, minimizava a angústia dos horários apertados. A Marianinha, prima-irmã, pelas injeções de ânimo via carinhosos telefonemas. Às minhas amigas do Pilates, companheiras sempre a postos, quando a coluna, a angústia ou o cansaço tentavam me afastar do computador.

A minha família – Fernando, Taissa, Marcella e Pedro – por me apoiarem e incentivarem a ir em frente, após os momentos difíceis vividos em 2011. A Taissa e Fernando, pela revisão do português, juntamente com Marcella, a quem também agradeço pela revisão do inglês, das avaliações de ciclo de vida, pelo apoio com o software SimaPro, as inúmeras discussões sobre a pesquisa e os artigos produzidos, o apoio logístico em Campinas, e sua fiel companhia nos congressos sobre construção sustentável.

E a todos que contribuíram para a realização deste trabalho e, desta forma, participaram da realização de um sonho.



*“Once we accept our limits, we go beyond them”*

*Albert Einstein*





## **LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1.1 - CONTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS SUBSISTEMAS CONSTRUTIVOS NO IMPACTO AMBIENTAL TOTAL DA EDIFICAÇÃO DO ESTUDO DE CASO DA REPÚBLICA TCHECA (HANS, 2012)	8
FIGURA 1.2 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DESTA PESQUISA	14
FIGURA 2.1 - DESEMPENHO AO LONGO DO TEMPO (ABNT NBR 15575-1: 2013 - ANEXO C).	25
FIGURA 5.1 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA ABORDAGEM METODOLÓGICA	65
FIGURA 5.2 - EXEMPLOS DE SISTEMA ESTRUTURAL DE PAVIMENTO-TIPO EM (A) LAJE NERVURADA COM VIGAS CHATAS EM CONCRETO ARMADO OU PROTENDIDO, (B) LAJE CONVENCIONAL EM CONCRETO ARMADO, (C) LAJE LISA EM CONCRETO PROTENDIDO, (D) LAJE NERVURADA COM VIGAS EM CONCRETO ARMADO (E) LAJE NERVURADA COGUMELO EM CONCRETO ARMADO	69
FIGURA 5.3 - DISTRIBUIÇÃO DO QUADRO DE INDICADORES DE DESEMPENHO AO LONGO DO CICLO DE VIDA DO SISTEMA ESTRUTURAL	84
FIGURA 5.4 - EXEMPLO DE MATRIZ AHP APRESENTADA AO PAINEL DE ESPECIALISTAS PARA ATRIBUIÇÃO DE PESOS ENTRE OS INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS.	101
FIGURA 6.1 - VÃOS MÉDIOS ENTRE PILARES E PESO PRÓPRIO DO PAVIMENTO-TIPO DAS TRINTA E UMA EDIFICAÇÕES DOS ESTUDOS DE CASO	105
FIGURA 6.2 - CORRELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE CONCRETO E ALTURA DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS, EXPRESSA PELA MÉDIA DAS ESPESSURAS EQUIVALENTES DAS ESTRUTURAS POR INTERVALO DE NÚMERO DE PAVIMENTOS DAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	109
FIGURA 6.3 - CORRELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE CONCRETO E ALTURA DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS, EXPRESSA PELA MEDIANA DAS ESPESSURAS EQUIVALENTES DAS ESTRUTURAS POR INTERVALO DE NÚMERO DE PAVIMENTOS DAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	109
FIGURA 6.4 - CORRELAÇÃO ENTRE DENSIDADE DE PILARES E ALTURA DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS, EXPRESSA PELA MEDIANA DO INVERSO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS PILARES PARA CADA INTERVALO DE NÚMERO DE PAVIMENTOS DAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	110
FIGURA 6.5 - CÁLCULO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL PONDERADOS E AGREGADOS, EXEMPLIFICADOS PARA O SISTEMA ESTRUTURAL DA ED. C	112
FIGURA 6.7 - DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL GLOBAL DOS PAVIMENTOS-TIPO DAS EDIFICAÇÕES, EXPRESSO EM UM RESULTADO ÚNICO OBTIDO PELO SOMATÓRIO DOS INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS NORMALIZADOS, PONDERADOS SEGUNDO O CENÁRIO T2 (PESOS IGUAIS)	113
FIGURA 6.8 - RELATÓRIO DE VUE PARA LAJES DO PAVIMENTO-TIPO DO ED. AB, SITUADO A 800M DO MAR, RJ, PARA DIFERENTES TEORES DE CA(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> COMO INIBIDOR DE CORROSÃO (TELA DO SOFTWARE LIFE-365 V.2.1.1)	116
FIGURA 6.9 - RESULTADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS DOS PAVIMENTOS-TIPO NORMALIZADOS EM RELAÇÃO AO SISTEMA ESTRUTURAL DA EDIFICAÇÃO X	121
FIGURA 6.10 - RESULTADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS NORMALIZADOS DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS DOS PAVIMENTOS-TIPO	122
FIGURA 6.11 - PERFIL DE DESEMPENHO AMBIENTAL DO PAVIMENTO-TIPO DAS 20 (VINTE) ESTRUTURAS EM CONCRETO PROTENDIDO	123
FIGURA 6.12 - PERFIL DE DESEMPENHO AMBIENTAL DO PAVIMENTO-TIPO DAS 11 (ONZE) ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO	123
FIGURA 6.13 - PERFIL DE DESEMPENHO AMBIENTAL DAS 31 SUPERESTRUTURAS: VALORES NORMALIZADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS	127
FIGURA 6.14 - TENDÊNCIAS DOS VALORES DOS INDICADORES AMBIENTAIS DA SUPERESTRUTURA E DOS PAVIMENTOS-TIPO DOS ESTUDOS DE CASO	128
FIGURA 6.15 - DESEMPENHO AMBIENTAL GLOBAL DOS PAVIMENTOS-TIPO DAS EDIFICAÇÕES, EXPRESSO EM UM RESULTADO ÚNICO OBTIDO PELO SOMATÓRIO DOS INDICADORES AMBIENTAIS PONDERADOS PELO CENÁRIO A1 (ADAPTADO DO ECO-INDICATOR 99)	135
FIGURA 6.16 - DESEMPENHO AMBIENTAL GLOBAL DOS PAVIMENTOS-TIPO DAS EDIFICAÇÕES, EXPRESSO EM UM RESULTADO ÚNICO OBTIDO PELO SOMATÓRIO DOS INDICADORES AMBIENTAIS PONDERADOS PELO CENÁRIO A2 (PESOS IGUAIS)	135

FIGURA 6.17 - DESEMPENHO AMBIENTAL GLOBAL DAS SUPERESTRUTURAS DAS EDIFICAÇÕES OBTIDO PELO SOMATÓRIO DOS INDICADORES AMBIENTAIS PONDERADOS DE ACORDO COM O CENÁRIO A1 (ADAPTADO DO ECO-INDICADOR 99)	137
FIGURA 6.18 - DESEMPENHO AMBIENTAL GLOBAL DAS SUPERESTRUTURAS DAS EDIFICAÇÕES, OBTIDO PELO SOMATÓRIO DOS INDICADORES AMBIENTAIS PONDERADOS DE ACORDO COM O CENÁRIO A2 (PESOS IGUAIS)	137
FIGURA 6.19 - VALORES NORMALIZADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS DOS PAVIMENTOS-TIPO DAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS (A) E COMERCIAIS (B)	138
FIGURA 6.20 - PERFIL DE DESEMPENHO AMBIENTAL DO SISTEMA ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS-TIPO DAS 5 (CINCO) EDIFICAÇÕES DE TIPOLOGIA COMERCIAL (CP)	138
FIGURA 6.21 - PERFIL DE DESEMPENHO AMBIENTAL DO SISTEMA ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS-TIPO DAS 15 (QUINZE) EDIFICAÇÕES DE TIPOLOGIA RESIDENCIAL (CP)	139
FIGURA 6.22 - PERFIS DE DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL DO SISTEMA ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS-TIPO DAS TIPOLOGIAS COMERCIAL (5) E RESIDENCIAL (15)	139
FIGURA 6.23 - CUSTO DO CICLO DE VIDA POR UNIDADE DE ÁREA ESTRUTURAL [R\$/M <sup>2</sup> AE] CALCULADO PELA SOMA DOS CUSTOS DE AQUISIÇÃO E CUSTOS DE REPAROS TRAZIDOS A VALOR PRESENTE – ANO BASE 2013 – PARA 50 ANOS DE VIDA ÚTIL DE PROJETO	143
FIGURA 6.24 - PERFIL DE DESEMPENHO ECONÔMICO DAS ESTRUTURAS DE EDIFICAÇÕES COMERCIAIS E RESIDENCIAIS EM CONCRETO PROTENDIDO	145
FIGURA 6.25 - RESULTADOS DO CONJUNTO DE INDICADORES DE DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL, AMBIENTAL E ECONÔMICO PARA O CENÁRIO G1 DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS TRÊS DIMENSÕES (PESOS IGUAIS)	146
FIGURA 6.26 - RESULTADOS DO CONJUNTO DE INDICADORES DE DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL, AMBIENTAL E ECONÔMICO PARA O CENÁRIO G2 DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS TRÊS DIMENSÕES	146
FIGURA 6.27 - RESULTADOS DO CONJUNTO DE INDICADORES DE DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL, AMBIENTAL E ECONÔMICO PARA O CENÁRIO G3 DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS TRÊS DIMENSÕES	147

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 5.1 - QUANTITATIVOS DE MATERIAL E ÁREA ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS-TIPO DOS ESTUDOS DE CASO	81
TABELA 5.2 - QUANTITATIVOS DE MATERIAL E ÁREA ESTRUTURAL DA SUPERESTRUTURA DOS ESTUDOS DE CASO	82
TABELA 5.3 - PARÂMETROS DE PROJETO UTILIZADOS PARA CÁLCULO DOS INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS	83
TABELA 5.4 - RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS À COMPRESSÃO (FCK), TRAÇOS UNITÁRIOS EM MASSA E CONSISTÊNCIA (ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE) DO CONCRETO COM CIMENTO CP III-32, ADOTADOS A PARTIR DE RESULTADOS DE PESQUISA NA REGIÃO DOS ESTUDOS DE CASO (SILVA ET AL., 2006)	87
TABELA 5.5 - CENÁRIOS DE PONDERAÇÃO: CENÁRIO A1 - PESOS ATRIBUÍDOS AOS INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL (ADAPTADO DO SISTEMA DE PONDERAÇÃO HIERÁRQUICA DO ECO-INDICADOR 99) E CENÁRIO A2 – PESOS IGUAIS ENTRE TODOS OS INDICADORES	94
TABELA 6.1 - RESULTADOS DOS CINCO INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS REFERENTES AOS PAVIMENTOS-TIPO E RESULTADOS DOS INDICADORES 1 E 2 PARA SUPERESTRUTURA	106
TABELA 6.2 - RESULTADOS DE MANN-WHITNEY U E P-VALOR E PARA INDICADORES DO PAVIMENTO-TIPO DOS GRUPOS CA E CP (STATHSOFT STATISTICA 10)	107
TABELA 6.3 - P-VALOR CALCULADO PARA ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS DE INDICADORES ENTRE PAVIMENTO-TIPO E SUPERESTRUTURA (STATHSOFT STATISTICA 10)	108
TABELA 6.4 - RESULTADO DA CONSULTA AO PAINEL DE ESPECIALISTAS: PONDERAÇÃO ATRIBUÍDA AOS INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS	111
TABELA 6.5 - CENÁRIO T1 - RESULTADO DA CONSULTA AO PAINEL DE ESPECIALISTAS: PONDERAÇÃO POR AHP ATRIBUÍDA AOS INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS E CENÁRIO T2 - PONDERAÇÃO COM PESOS IGUAIS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	111
TABELA 6.6 - RESULTADOS E DADOS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DA VIDA ÚTIL DAS LAJES DOS PAVIMENTOS-TIPO COM O SOFTWARE LIFE-365 V.2.1.1	114
TABELA 6.7 - RESULTADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS DO PAVIMENTO-TIPO DOS ESTUDOS DE CASO	119
TABELA 6.8 - RESULTADOS DE P-VALOR E MANN-WHITNEY U PARA INDICADORES DO PAVIMENTO-TIPO DOS GRUPOS CA E CP (STATHSOFT STATISTICA 10)	120
TABELA 6.9 - RESULTADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS DA SUPERESTRUTURA DOS ESTUDOS DE CASO	124
TABELA 6.10 - RESULTADOS DO P-VALOR E MANN-WHITNEY U PARA INDICADORES DA SUPERESTRUTURA DOS GRUPOS CA E CP (STATHSOFT STATISTICA 10)	125
TABELA 6.11 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS DA SUPERESTRUTURA E DO PAVIMENTO-TIPO (STATHSOFT STATISTICA 10)	126
TABELA 6.12 - RESULTADOS DE DESEMPENHO AMBIENTAL PONDERADO DOS PAVIMENTOS-TIPO DE VALORES NORMALIZADOS (ADIMENSIONAIS) DE INDICADORES – CENÁRIO A1 (ECO-INDICADOR 99)	133
TABELA 6.13 - RESULTADOS DE DESEMPENHO AMBIENTAL PONDERADO DOS PAVIMENTOS-TIPO DE VALORES NORMALIZADOS (ADIMENSIONAIS) DE INDICADORES – CENÁRIO A2 (PONDERAÇÃO COM PESOS IGUAIS)	134
TABELA 6.14 - SOMATÓRIO DOS INDICADORES DAS SUPERESTRUTURAS APÓS NORMALIZAÇÃO E PONDERAÇÃO DE ACORDO COM DOIS CENÁRIOS	136
TABELA 6.15 - COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE REPAROS PARA ADAPTAÇÃO NA ENTRADA DE DADOS NO SOFTWARE LIFE-365 V.2.1.1 INCLUINDO FÔRMAS, AÇOS (CA E CP), CONCRETO E MÃO-DE-OBRA DE RECUPERAÇÃO PARA CÁLCULO DO CCV DO PAVIMENTO-TIPO	141
TABELA 6.16 - RESULTADOS DO CCV E SUAS VARIÁVEIS PARA OS PAVIMENTOS-TIPO ESTUDADOS	142
TABELA 6.17 - RESULTADOS DO P-VALOR E MANN-WHITNEY U PARA OS COMPONENTES DO CCV DOS PAVIMENTOS-TIPO DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CA E CP (STATHSOFT STATISTICA 10)	144
TABELA 6.18 - CONJUNTO DE INDICADORES DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CONCRETO, SUA DESCRIÇÃO, MÉTRICAS E MEDIANAS DOS VALORES DOS INDICADORES CALCULADOS PARA: OS 31 ESTUDOS DE CASO; 11 ESTUDOS DE CASO EM CONCRETO ARMADO (CA); E 20 EM CONCRETO PROTENDIDO (CP)	152

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

EQUAÇÃO 4.1	57
EQUAÇÃO 4.2	58
EQUAÇÃO 4.3	58
EQUAÇÃO 5.1	88
EQUAÇÃO 5.2	88
EQUAÇÃO 5.3	88
EQUAÇÃO 5.4	89
EQUAÇÃO 5.5	96
EQUAÇÃO 5.6	98
EQUAÇÃO 5.7	99
EQUAÇÃO 5.8	99

## LISTA DE SIGLAS

### A

ABNT. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*  
ACCV. *Avaliação do Custo do Ciclo de Vida*  
ACGCV. *Avaliação do Custo Global do Ciclo de Vida*  
ACV. *Avaliação de Ciclo de Vida*  
ACV-S. *Avaliação social do ciclo de vida*  
ANA. *Agência Nacional das Águas*  
AP. *Acidification of land and water resources potential - Potencial de acidificação da água e do solo*  
ARP. *Adaptive Reuse Potential*  
ASCV. *Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida*  
ASTM. *American Society for Testing and Materials*  
ACI. *American Concrete Institute*  
AHP. *Analytic Hierarchy Process - Processo de Análise Hierárquica*  
AICV. *Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida*

### B

BEES. *Building for Environmental and Economic Sustainability*  
BRE. *Building Research Establishment*  
BREEAM. *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*  
bWF. *blue Water Footprint - Pegada de Água azul*

### C

CCV. *Custo do Ciclo de Vida*  
CEN. *Comité europeén de normalisation*  
CETESB. *Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental*  
CIB. *Conceil Internationale du Bâtiment*  
CNI. *Confederação Nacional da Indústria*  
CRISP. *Construction and city related sustainability indicators*  
CSTB. *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*  
CA. *Concreto Armado*  
CBIC. *Câmara Brasileira da Indústria da Construção*  
CP. *Concreto Protendido*

### D

DGNB. *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*  
DNPM. *Departamento Nacional de Produção Mineral*  
DPSIR. *força motriz-pressão-estado-impacto-resposta*  
DSR. *força motriz-pressão-estado-resposta*

### E

EACI. *Executive Agency for Competitiveness and Innovation*  
EEn ren. *Embodied Primary Non-renewable Energy - Energia Primária Incorporada não renovável*  
EEren. *Embodied Primary Renewable Energy - Energia Primária Incorporada Renovável*  
ENSLIC. *Energy Saving through Promotion of Life Cycle Analysis*  
EP. *Eutrophication potential - Potencial de eutrofização*  
EPD. *Environmental Product Declaration*  
ECO<sub>2e</sub>. *Embodied Carbon Equivalent - Carbonon Equivalente Incorporado*  
ELCD. *European Life Cycle Database*  
EN. *European Normalisation*

## **F**

FCAV. *Fundação Carlos Alberto Vanzolini*

## **G**

GPI. *Genuine Progress Indicator*

## **I**

IBAMA. *Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis*

IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*

IBGE PAIC. *Pesquisa Anual da Indústria da Construção realizada pelo IBGE*

IBU. *Institute Construction and Environment*

IO. *input-output*

IPT. *Instituto de Pesquisas Tecnológicas*

ISO. *International Organization for Standardization*

ITC-CNR. *Istituto per le Tecnologie della Costruzione - Consiglio Nazionale delle Ricerche*

IPCA. *Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo*

IPEA. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada*

## **L**

LEED. *Leadership in Energy and Environmental Design*

LENSE. *Label for Environmental, Social and Economic Buildings*

LoRe-LCA. *Low Resource consumption buildings and constructions by use of LCA in design and decision making*

LABOR. *Laboratório de Custos e Orçamentos de Construção da Universidade Federal do Espírito Santo*

## **M**

Mc. *Materials Content - Consumo de recursos materiais*

## **N**

NIST. *National Institute of Standards and Technology*

NRc. *Non-renewable raw material content - Conteúdo de matéria prima não renovável*

## **O**

ODP. *Stratospheric Ozone Layer Depletion Potential - Potencial de Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico*

OECD. *Organisation for Economic Co-operation and Development*

## **P**

PERFECTION. *Performance indicators for health, comfort and safety of the indoor environment*

PIB. *Produto Interno Bruto*

POCP. *Photochemical Ozone Creation Potential - Potencial de formação de ozônio troposférico*

PRESCO. *European thematic network on Practical Recommendations for Sustainable Construction*

PTE. *Pós-tensão Engenharia*

## **Q**

QUALITEL. *Qualité Logement*

## **R**

RILEM. *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*

## **S**

*SB. Sustainable building*

*SBA. Sustainable Building Alliance*

*SBAT. Sustainable Building Assessment Tool*

*SuPerBuildings. Sustainability and Performance Assessment and Benchmarking of Buildings*

*SELIC. Sistema Especial de Liquidação e de Custódia*

## **U**

*UF. Unidade funcional*

*UN CSD. Comissão das Nações Unidas para Desenvolvimento Sustentável*

*UNEP. United Nations Environmental Programme*

*UNEP SBCI. UNEP Sustainable Building Construction Initiative*

## **V**

*VPL. Valor Presente Líquido*

*VTT. Technical Research Centre of Finland*

*VU. Vida útil*

*VUe. Vida útil estimada*

*VUP. Vida útil de projeto*

## **LISTA DE QUADROS**

QUADRO 1.1 - TIPOS DE INDICADORES POR FUNÇÃO (EEA, 2005)	2
QUADRO 2.1 - EXIGÊNCIAS DOS USUÁRIOS QUANTO À SEGURANÇA, E SEUS REQUISITOS E CRITÉRIOS CORRESPONDENTES (ABNT NBR 15575-1: 2013).	20
QUADRO 2.2 - EXIGÊNCIAS DOS USUÁRIOS QUANTO À SUSTENTABILIDADE, REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO CORRESPONDENTES (ABNT NBR 15575-1: 2013)	23
QUADRO 2.3 - PRAZOS DE VIDA ÚTIL DE PROJETO, VUP (ANEXO C, ABNT NBR 15575-1:2013;CBIC, 2013)	26
QUADRO 2.4 - RELAÇÃO DE INDICADORES FUNCIONAIS ENCONTRADOS NA LITERATURA E REQUISITOS DE DESEMPENHO CORRESPONDENTES	32
QUADRO 3.1 - RELAÇÃO DOS PRINCIPAIS INDICADORES AMBIENTAIS ENCONTRADOS NA LITERATURA	40
QUADRO 3.2 - ENERGIA INCORPORADA POR UNIDADE DE MASSA E/OU POR UNIDADE DE ÁREA CONSTRUÍDA DE ALGUNS MATERIAIS UTILIZADOS EM SISTEMAS ESTRUTURAIS EM CONCRETO	42
QUADRO 4.1 - GRUPOS DE VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O CUSTO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO (BATLOUNI NETO, 2011)	54
QUADRO 4.2 - VARIÁVEIS QUE COMPÕEM O CCV (ADAPTADO DA ISO 15686-5:2008)	60
QUADRO 5.4 - RESUMO DAS TIPOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES E DOS SISTEMAS ESTRUTURAIS CORRESPONDENTES	66
QUADRO 5.5 - DIFERENTES SISTEMAS DE LAJES DAS EDIFICAÇÕES DE TIPOLOGIA RESIDENCIAL	67
QUADRO 5.6 - SISTEMAS DE LAJES DAS EDIFICAÇÕES DE TIPOLOGIA COMERCIAL	67
QUADRO 5.7 - DESCRIÇÃO DAS EDIFICAÇÕES CONTENDO IDENTIFICAÇÃO, TIPOLOGIA, ANO DO PROJETO, NÚMERO DE PAVIMENTOS, TIPO DE LAJES DO PAVIMENTO-TIPO E RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ESPECIFICADA EM PROJETO	68
QUADRO 5.1 - PRINCIPAIS CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE INDICADORES (A PARTIR DE ROYUELA, 2001; SEGNSTAM, 2002; OECD, 2003)	72
QUADRO 5.2 - CRITÉRIOS CIENTÍFICOS E PRÁTICOS NA ESCOLHA DE INDICADORES (MALMQVIST, GLAUMANN, 2006)	73
QUADRO 5.3 - CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS (A PARTIR DE SCHMIDT-BLEEK, 2009; GILJUM ET AL., 2006; BURGER ET AL., 2009)	73
QUADRO 5.8 - UNIDADES FUNCIONAIS E FONTES DOS DADOS DE INVENTÁRIO UTILIZADOS PARA MODELAR AS ACV DOS MATERIAIS DAS ESTRUTURAS ESTUDADAS	86
QUADRO 6.1 - MATERIAIS EMPREGADOS, PREÇOS UNITÁRIOS INCLUINDO MÃO DE OBRA E FONTE DOS DADOS	140
QUADRO 6.2 - CENÁRIOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS TRÊS DIMENSÕES	145



## **APÊNDICE A - LISTA DE QUADROS**

QUADRO A.1 - PRINCIPAIS CENTROS DE REFERÊNCIA, EM NÍVEL MUNDIAL, NO TEMA INDICADORES	179
QUADRO A.2 - PRINCIPAIS INICIATIVAS, ORGANIZAÇÕES E PAÍSES ENVOLVIDOS, PRINCIPAIS DOCUMENTOS PRODUZIDOS NO TEMA INDICADORES PARA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL	181

## **APÊNDICE B - LISTA DE FIGURAS**

FIGURA B.1 - MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA E VARIABILIDADE PARA ESPESSURA EQUIVALENTE [M3/M2A] E CONSUMO DE AÇO [KG/M2AE] NA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS-TIPO EM CA E CP (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	185
FIGURA B.2 - MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA E VARIABILIDADE PARA RELAÇÃO H/ℓ RELAÇÃO, RELAÇÃO HV/HL E DENSIDADE DE PILARES NA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS-TIPO EM CA E CP (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	186
FIGURA B.3 - MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA E VARIABILIDADE DOS INDICADORES - ESPESSURA EQUIVALENTE DE CONCRETO (VOL. CONC./M2AE) E CONSUMO DE AÇO (KG/M2AE) NUMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTO-TIPO E SUPERESTRUTURA (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	186
FIGURA B.4 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA, E VARIABILIDADE DOS INDICADORES AP, EP, POCP E ODP, NUMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS-TIPO DOS GRUPOS CA E CP (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	187
FIGURA B.5 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA, E VARIABILIDADE DOS INDICADORES ECO2E, BWF, EEREN, EEN.REN, NRC E MC, EM ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS-TIPO DOS GRUPOS (CA) E (CP) (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	188
FIGURA B.6 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA, E VARIABILIDADE DOS INDICADORES AP, ODP, EP, POCP, ECO2E E BWF NUMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SUPERESTRUTURAS EM CA E CP (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	189
FIGURA B.7 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA, E VARIABILIDADE DOS INDICADORES EEREN, EEN.REN, NRC E MC, NUMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SUPERESTRUTURAS EM CA E CP (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	190
FIGURA B.8 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA E VARIABILIDADE DOS INDICADORES ECO2E, BWF, EEREN, EEN.REN, NRC E MC NUMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A SUPERESTRUTURA E O PAVIMENTO-TIPO DE CADA ESTUDO DE CASO (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	191
FIGURA B.9 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA E VARIABILIDADE DOS INDICADORES POCP, ODP, AP E EP NUMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SUPERESTRUTURA E PAVIMENTO-TIPO DOS ESTUDOS DE CASO (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	192
FIGURA B.10 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS, MEDIANA E VARIABILIDADE DAS VARIÁVEIS COMPONENTES DO CCV (CUSTO DE AQUISIÇÃO E CUSTO DE REPAROS) E DO CCV, NUMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PAVIMENTOS-TIPO EM CONCRETO ARMADO (CA) E CONCRETO PROTENDIDO (CP) (TELA ORIGINAL DO SOFTWARE STATISTICA 10, V.10.0.1011.0)	193





## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

#### 1.1.1 O papel dos indicadores na avaliação de sustentabilidade

A construção civil é a atividade mais onipresente da humanidade, a base do estilo de vida moderno e urbano. É responsável por cerca de 10% da produção econômica mundial (com receita superior a R\$ 267 bilhões no Brasil em 2011), dá emprego a centenas de milhões de pessoas, consome 3 bilhões de toneladas de matérias-primas anualmente, o que representa em torno de 40% a 50% do consumo mundial de recursos. Como maior emissora de gases de efeito estufa<sup>2</sup>, responde por cerca de 50% das emissões globais de dióxido de carbono (KHASREEN et al., 2009; PURNELL, 2011; IBGE PAIC 2011).

Este panorama mostra o quanto a busca pela sustentabilidade deste setor da indústria é crucial para a sociedade. Por isso, é fundamental disseminar a informação quantificada sobre os efeitos da construção, uso, manutenção e destinação final das edificações no meio ambiente e uma estratégia para disponibilizar este conhecimento consiste na utilização de indicadores (KALLAOS, 2010).

Interpretado em diferentes contextos, um indicador é definido como um *parâmetro (propriedade medida ou observada) ou valor derivado de parâmetros que fornece informações sobre determinado fenômeno* (OECD, 1993). Ou ainda, *uma medida, em geral, quantitativa, que pode ser usada para ilustrar e comunicar fenômenos complexos de forma simples, incluindo tendências e progresso ao longo do tempo*. Um sistema de indicadores constitui uma ferramenta valiosa de suporte à decisão que auxilia a gestão e o planejamento (EEA, 2005).

Aplicado à dimensão ambiental da sustentabilidade, o indicador *descreve o estado do ambiente e seu impacto nos seres humanos, ecossistemas e materiais, as pressões no meio ambiente, as forças motrizes e as respostas daquele sistema* (EEA, 2005). Esta definição demonstra sua ampla

---

<sup>2</sup> Emissões de gases oriundos da combustão de combustíveis, reações dos processos e processos de tratamento, incluindo dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>; hidrocarboneto metano, CH<sub>4</sub>; óxido nitroso, N<sub>2</sub>O; hidrofluorcarbonos, HFC's; perfluorcarbonos, PFC's e hexafluoreto de enxofre, SF<sub>6</sub>, excluindo as emissões liberadas na produção de eletricidade comprada (WBCSD, 2000).

gama de aplicações. Em função do seu propósito, os indicadores podem ser bem detalhados ou altamente agrupados (MALMQVIST; GLAUMANN, 2006).

Diversas características definem um bom indicador. Segundo a OECD (2003), os indicadores devem ser relevantes, adequados à análise a que se propõem e, principalmente, mensuráveis. De acordo com a ISO/TS 21929-1: 2006, eles devem ser objetivos, seus resultados rastreáveis e ter como funções principais a quantificação, simplificação e comunicação.

A agência ambiental europeia classifica os indicadores em descritivos, de desempenho, de eficiência política, de bem-estar total (EEA, 1999) e de ecoeficiência (EEA, 2005). A caracterização de cada tipo está sintetizada no Quadro 1.1. O desenvolvimento dos três últimos tipos de indicadores foi, àquela época, considerado um dos grandes desafios do futuro (EEA, 2005).

**Quadro 1.1- Tipos de indicadores por função (EEA, 2005)**

<b>Tipo de indicador</b>	<b>Descrição</b>
<b>Descritivo</b>	Descrevem, caracterizam um determinado tópico. Refletem como está a situação, sem referência de como deveria ser.
<b>Desempenho</b>	Comparam as condições atuais com uma série de valores de referência, a exemplo de metas ou resultados esperados.
<b>Eficiência política</b>	Possibilitam a avaliação da eficiência das ações, refletindo qual a relação, quantitativa e qualitativa, entre meios empregados e resultados obtidos.
<b>Bem-estar total</b>	Devem abordar aspectos ambientais e intergeracionais relativos à qualidade de vida.
<b>Ecoeficiência</b>	Tratam de questões como o valor e a degradação do capital natural, fluxos globais de recursos e custo-eficiência.

Estruturas analíticas para organizar indicadores, sobretudo ambientais, foram desenvolvidas na década de 80 com base em algumas abordagens tratadas isoladamente ou de forma combinada. Dentre elas, cita-se *a abordagem por meios* (a partir dos componentes ambientais – solo, ar, água, entre outros), *o modelo pressão-resposta* (impactos da atividade humana sobre o ambiente e sua consequente transformação) e *a contabilização de recursos* (traçando o fluxo de recursos naturais desde sua extração, processamento, uso final, até o retorno ao ambiente, em emissões e resíduos, ou para a economia, por meio de reciclagem) (SILVA, 2007).

Como os trabalhos iniciais de estruturação de indicadores se concentraram mais no estado do ambiente, monitorando suas alterações físicas, mas sem explicitar as causas ou sugerir soluções, foram desenvolvidas abordagens pressão-resposta mais abrangentes, como o *modelo PSR*

(*pressão-estado-resposta*) adotado pela OECD e suas variações que são o *DSR (força motriz-estado-resposta)* adotado pela Comissão das Nações Unidas para Desenvolvimento Sustentável (*UN CSD*) e o *DPSIR (força motriz-pressão-estado-impacto-resposta)* adotado pela agência ambiental europeia (SILVA, 2007).

Pioneira, a OECD iniciou em 1989 o programa sobre indicadores ambientais com três objetivos principais, que consistiam em medir o progresso e desempenho ambientais; monitorar e promover políticas integradas para garantir que a questão ambiental fosse considerada na formulação e implementação das políticas setoriais de transporte, energia e agricultura; e assegurar uma integração similar da questão ambiental com as políticas econômicas (OECD, 1993).

Entretanto, países da OECD estavam interessados em utilizar um número reduzido de indicadores, selecionados a partir de um conjunto maior, para informar a sociedade civil e apoiar a comunicação com o público. Para tanto, a OECD identificou em 2001 uma lista reduzida de indicadores ambientais-chave. Sua seleção considerou a relevância política com relação aos principais desafios da primeira década do século XXI, incluindo questões referentes à poluição, aos recursos naturais e ativos ambientais, sua robustez analítica e sua mensuração (OECD, 2008).

Segundo Silva (2007), no final da década de 1990, os métodos de avaliação de edificações relacionavam medidas de desempenho a metas de sustentabilidade (ambiental) definidas teórica ou empiricamente. Em 2003, foram iniciados estudos para considerar, também, os efeitos econômicos e sociais relacionados à construção e operação das edificações. O conjunto de normas ISO AWI 15392:2005 sobre sustentabilidade de edificações e ativos construídos foi desenvolvido para que as avaliações de sustentabilidade de edificações seguissem uma estrutura comum e uma coleção principal de indicadores (ISO AWI 21932: 2002; ISO TS 21929: 2006).

Nesta evolução, o comitê técnico europeu CEN/TC 350 de sustentabilidade da construção vem desenvolvendo um conjunto de normas para a avaliação de sustentabilidade das edificações, dentre as quais, cita-se a EN 15643-2:2011, para avaliação ambiental das edificações, e, mais recentemente, a EN 15804:2012, que regulamenta as declarações ambientais dos produtos (EPDs) da construção, de acordo com a BS EN ISO 14025:2010. Este assunto será retomado adiante.

### 1.1.2 Os sistemas de avaliação e certificação de edificações (e sistemas estruturais)

Iniciativas de pesquisa para as novas gerações de sistemas de avaliação de edificações sustentáveis afirmam que seu nível de sustentabilidade deve ser avaliado sempre com ajuda de indicadores, cuja validação e comparabilidade sejam asseguradas. Sua seleção e justificativa devem ser baseadas na compreensão clara sobre as questões de interesse e a relevância do setor de edificações para estas questões (HAKKINEN et al., 2012, CRISP PeBBu, 2005, LUETZKENDORF et al., 2011; HAKKINEN, 2012).

Dentre os sistemas, cita-se o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), o NABERS (*National Australia Built Environment Rating System*), o CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*), o Ecoeffect, o BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), e o SBAT (*Sustainable Building Assessment Tool*), entre outros. Como eles objetivam atender aos projetistas e meio técnico em geral, sua relevância prática recebe mais atenção do que aspectos teóricos associados aos indicadores (GIBBERD, 2009; MALQVIST; GLAUMANN, 2006).

Entretanto, estes sistemas de avaliação não dispensam atenção específica aos sistemas estruturais. A maioria deles, ao tratar o tema *materiais e recursos*, pontua iniciativas de redução de consumo de recursos naturais não renováveis, tais como, reciclagem, reuso, flexibilidade, sem, no entanto, discriminar o sistema estrutural da edificação, a não ser pela menção ao reuso da estrutura existente. Exceção faz-se aos sistemas AQUA<sup>3</sup> e ao japonês CASBEE.

O manual técnico CASBEE-NC JSBC, 2010, no item *materiais e recursos* recomenda, como redução do uso de recursos não renováveis, a continuidade do uso da estrutura existente, o uso de reciclados como materiais estruturais, o uso de materiais estruturais que diminuam o consumo de recursos adotando, por exemplo, resistências mínimas para armaduras ativas e passivas, concreto, aço de estruturas metálicas e uso de concreto protendido. Contém ainda, recomendações visando à adaptabilidade, que envolvem a capacidade de sobrecarga adicional nas lajes para suportar mudanças potenciais de uso, além de valores mínimos para o pé direito.

Já no sistema AQUA<sup>4</sup>, o sistema estrutural é abordado quanto à qualidade ambiental do edifício (QAE), por meio de exigências que discriminam as estruturas portantes vertical e horizontal. São

---

<sup>3</sup> Alta Qualidade Ambiental, adaptação brasileira feita pela fundação Carlos Alberto Vanzolini, do sistema francês HQE (*Haute Qualité Environnementale*).

<sup>4</sup> No referencial técnico de certificação Edifícios habitacionais - Processo AQUA© FCAV – Fevereiro 2010 - Versão 1, na categoria 2 – Escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos.

elas:

- (i) *uso de produtos, sistemas e processos que apresentem ao final da vida útil do edifício maior facilidade para desconstrução seletiva e maior potencial de reuso ou reciclagem, para no mínimo 50% dos elementos, em custo global, das famílias “estrutura portante vertical e horizontal”, por comparação;*
- (ii) *uso de cimento Portland dos tipos CP III ou CP IV em concretos moldados in loco ou usinados e em elementos pré-moldados fabricados com cimento;*
- (iii) *escolha de fabricantes de produtos que não praticam a informalidade na cadeia produtiva, no caso da estrutura portante vertical, horizontal e fundações. Com percentuais mínimos de 50% da quantidade total dos produtos de cada uma das famílias, em custo global.*

Ressalta-se, porém, que os sistemas de avaliação encontram-se, hoje, em uma fase de transição. Por um lado, sistemas que abordam apenas questões ambientais e relativas à saúde humana precisam evoluir para abranger todas as dimensões e aspectos da sustentabilidade, incluindo o desenvolvimento de critérios de desempenho funcional, técnico e econômico. As normas europeias e internacionais, assim como o princípio de dedução dos critérios de avaliação a partir de temas de interesse (*top down approach*) dão o suporte necessário a esta evolução. (LUETZKENDORF et al., 2011; TOLLER et al., 2011; BLUYSSSEN et al., 2011).

Em seguimento ao foco inicial em certificação, rotulagem e premiação, a disponibilização e avaliação dos resultados como uma fonte de informação para terceiros vem ganhando importância crescente. A formatação da comunicação dos resultados varia de (i) totalmente agregados (um índice), (ii) parcialmente agregados, a (iii) resultados individuais, sem ponderação, para determinados indicadores, tornando-se fundamental compreender as necessidades das partes interessadas (LUETZKENDORF et al., 2011).

É sabido que os desempenhos técnico, funcional, ambiental, econômico e social devem ser considerados em uma avaliação completa de sustentabilidade das edificações e partes dela. Os indicadores utilizados podem ser organizados para permitir a inclusão de uma ampla representação de aspectos de sustentabilidade, desde que relevantes às perspectivas das partes interessadas (UN ST/ESCAP/ 2561, 2009).

Por outro lado, há a tendência de se passar da avaliação qualitativa orientada à solução, para uma avaliação quantitativa orientada ao desempenho, com base nas técnicas de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Avaliação do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) (LUETZKENDORF et al., 2011).

Como exemplo deste tipo de avaliação cita-se o sistema europeu de avaliação de edificações sustentáveis, DGNB<sup>5</sup>, orientado a desempenho, com base na técnica de ACV para toda a edificação e em valores de referência no seu processo de certificação. Informações fornecidas nas EPDs são usadas diretamente de modo quantificado pelos sistemas de avaliação de edificações e constituem a base para a avaliação ambiental do sistema DGNB. Declarações ambientais de produtos consistentes com a BS EN ISO 14025:2010 oferecem um formato e estrutura de verificação ideais, para disponibilizar informação imparcial de forma transparente. Este procedimento está alinhado com a recém-publicada normalização no campo da construção sustentável EN 15804:2012 (BRAUNE et al., 2011).

A EN 15804:2012 fornece a estrutura para que as EPDs dos produtos, processos e sistemas construtivos sejam obtidas, verificadas e apresentadas de modo harmonizado. A EPD é expressa de uma forma que permita a agregação (adição) para fornecer informações completas para edificações, sem, no entanto, tratar com agregação no nível da edificação ou descrever as normas de execução da EPD em uma avaliação da edificação. A norma refere-se às declarações ambientais de produto tipo III<sup>6</sup>, e não avalia desempenho social ou econômico dos produtos (EN 15804:2012).

A comunidade científica se mobiliza em direção à avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida (ASCV), que se refere à avaliação dos impactos negativos e benefícios ambientais, sociais e econômicos em processos de tomada de decisão para produtos mais sustentáveis em todo o seu ciclo de vida (UNEP/SETAC, 2011). É um conceito relativamente novo, que tem pela frente o desafio de integrar ACV, ACCV e ACV-S<sup>7</sup> em uma metodologia capaz de acomodar técnicas desenvolvidas independentemente, em épocas distintas e com diferentes regras de cálculo, *frameworks* e terminologias (HEIJUNGS et al., 2012).

Ao se pensar em sustentabilidade na atividade de construção civil, principalmente nos países em desenvolvimento, é importante incluir também na base de informação para decisão quanto à especificação do sistema estrutural, alguns indicadores sociais, além daqueles relacionados com a saúde humana, tais como: trabalho infantil, custo de vida, liberdade de associação, horas trabalhadas, trabalho forçado/escravo, igualdade de oportunidade, saúde e segurança, benefícios sociais e seguridade social, entre outros. Nesta linha, ressaltam-se os indicadores propostos pela

<sup>5</sup> Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (German Sustainable Building Council).

<sup>6</sup> Declaração ambiental que fornece dados ambientais quantificados, usando parâmetros pré-determinados, e informação ambiental adicional, onde relevante.

<sup>7</sup> ACV social.



comissão de trabalho de indicadores sociais da *United Nations Environmental Programme/Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, (UNEP, 2009), e os propostos pelo Instituto Ethos.

Entretanto, a revisão da literatura (REAP, 2008; HEIJUNGS et al., 2012) aponta dificuldades relativas à integração da técnica de ACV, utilizada para avaliar desempenho ambiental, com aspectos sociais, tais como (i) a falta de consenso sobre como integrar e calcular os impactos sociais dos produtos, tendo em vista que as metodologias de impacto social ainda estão embrionárias, e (ii) o fato de que a maioria dos impactos sobre as pessoas são independentes dos processos físicos de produção, aumentando a complexidade da relação produto-impacto.

Isto evidencia que o avanço nas diferentes dimensões da sustentabilidade é desigual. No setor de construção civil brasileiro, em que as edificações em concreto predominam, dados de avaliação integrada de desempenho funcional, ambiental, econômico e social no ciclo de vida das edificações ou de seus subsistemas são, praticamente, inexistentes.

Diante do exposto, a dimensão social não foi incorporada ao conjunto de indicadores de desempenho propostos nesta pesquisa. Entende-se que a consideração das dimensões funcional, ambiental e econômica para avaliação da sustentabilidade das estruturas em concreto já representa uma importante contribuição para (1) aproximar a prática típica de engenharia estrutural no Brasil - hoje limitada, praticamente, à consideração de atendimento aos requisitos de segurança estrutural e no uso, custos iniciais e tempo de execução - da tendência mundial para a sustentabilidade; e (2) os processos de projeto nacionais, sistemas de certificação ambiental, e *frameworks*<sup>8</sup> de avaliação integrada de sustentabilidade com base em ACV e ACCV.

Ressalta-se, no entanto, que sob o ponto de vista de muitos pesquisadores, indicadores funcionais e sociais se sobrepõem e por isso devem ser agrupados (LUETZKENDORF et al., 2011, DORING et al., 2011). Como exemplo, requisitos de conforto, segurança e proteção à saúde do usuário final e do operário durante a construção são considerados como valores sociais (ISO 21931-1: 2010; ISO 15392:2008).

### **1.1.3 A importância do sistema estrutural no desempenho ambiental e econômico de edificações**

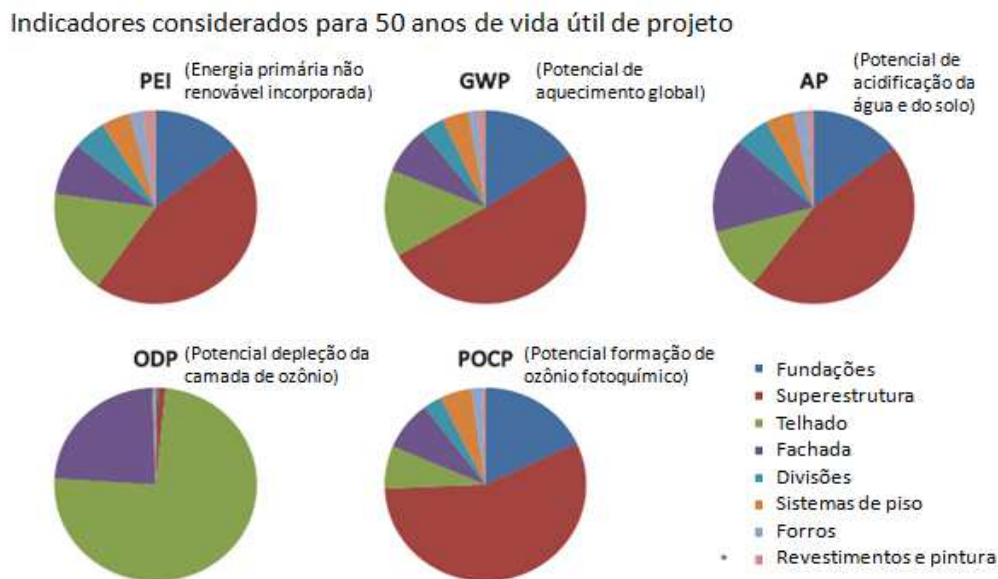
Estudos indicaram (DOBBELSTEEN et al., 2005, DOBBELSTEEN et al., 2007) que o consumo

---

<sup>8</sup> Sistemas estruturados.

de energia durante o uso e operação de edificações do hemisfério norte com vida útil em torno de 75 anos representa a parcela majoritária de sua carga ambiental total. Para matrizes energéticas mais limpas, como a do Brasil, e em contextos de esforços contínuos para elevar a eficiência energética, ou mesmo chegar a *edifícios de energia zero* (KIBERT, 2011, SMUTNY et al., 2011, TREBERSPURG, DJALILI, 2011), implementados nos últimos anos, o desafio atual de otimização de desempenho ambiental vem gradualmente passando de cargas e energia operacionais para se concentrar em materiais, sistemas e processos construtivos (IEA ECBCS ANNEX 57, 2011).

É importante mencionar que vários estudos com base em ACV, têm mostrado o sistema estrutural<sup>9</sup> e o envelope como principais contribuintes para as cargas ambientais de uma edificação (DOBBELSTEEN et al., 2005; HAPPIO; VIITANIEMI, 2008; ENSLIC, 2009; KELLENBERGER; ALTHAUS, 2009; MOON, 2009; HANS et al., 2012). Dentre esses, a Figura 1.1 mostra a predominância do sistema estrutural no impacto total da edificação, por meio de um conjunto de indicadores de sustentabilidade ambiental para avaliação de edificações aplicado a estudos de caso residenciais e/ou comerciais na Alemanha, Espanha, Finlândia, França, EUA e República Tcheca (HANS et al., (2012).



**Figura 1.1 - Contribuição dos principais subsistemas construtivos no impacto ambiental total da edificação do estudo de caso da República Tcheca (HANS, 2012)**

No entanto, a norma brasileira de desempenho, ABNT NBR 15575-1:2013, com relação à *adequação ambiental*, declara que no atual estado das técnicas de avaliação do impacto ambiental

<sup>9</sup> O sistema estrutural é composto pelos elementos de sustentação da edificação, tais como: lajes, vigas, paredes portantes e pilares, que compõem a superestrutura, e as fundações, que transmitem o carregamento ao solo.

resultante das atividades da cadeia produtiva da construção, não é possível estabelecer critérios e métodos de avaliação relacionados à expressão desse impacto.

Com isso a norma é vaga, recomendando apenas que os empreendimentos sejam projetados, construídos e mantidos minimizando as alterações no ambiente, sem prover suporte à especificação de indicadores ambientais. O presente estudo buscou orientação na literatura e em normas internacionais de desempenho.

Dentre todos os subsistemas da edificação, o estrutural é o de maior valor do ponto de vista econômico. Estudos sobre edificações em concreto armado situadas na grande São Paulo, constataram que o sistema estrutural representa em média, 17,69% do custo total (BATLOUNI NETO, 2003), próximos dos 18% sugeridos por Mascaró (1998). Deve-se ressaltar, no entanto, que diversos fatores influenciam o custo da estrutura. Dentre eles, a geometria da arquitetura (principalmente a altura), a sobrecarga acidental (função do tipo de utilização), a vida útil de projeto, a rigidez almejada, o local e a velocidade de execução (BATLOUNI NETO, 2011).

Segundo Nunem e Mooiman (2011), sustentabilidade consiste na capacidade da edificação de cumprir determinados requisitos (funcionais) de desempenho, enquanto sujeitos a fatores de degradação e à necessária manutenção, com o menor impacto negativo desses componentes no ambiente. Sendo assim, outra questão importante a respeito da sustentabilidade se refere a sua dimensão funcional, em que a durabilidade exerce papel fundamental e influencia decisivamente a vida útil das edificações. Esta, por sua vez, é definida pela vida útil do seu sistema estrutural, que, conseqüentemente, define a extensão do período de atividades de manutenção da edificação completa. Portanto, a vida útil do sistema estrutural influencia não apenas os desempenhos funcional (durabilidade) e ambiental (utilização de material) da edificação, mas também, seus desempenhos social (mão-de-obra e serviços) e econômico (custos do ciclo de vida).

## **1.2 PRINCIPAIS CENTROS DE REFERÊNCIA E INICIATIVAS NO TEMA**

Um dos maiores esforços para reunir informações sobre indicadores ambientais para o setor de construção civil foi o projeto CRISP (*Construction and City Related Sustainability Indicators*), com cerca de 500 indicadores dos tipos pressão, desempenho, estado, impacto, resposta e eficiência (HÄKKINEN et al., 2002). Posteriormente, o mesmo grupo pesquisou a aplicação destes indicadores em edificações projetadas com base em desempenho. Os resultados mostraram que um considerável trabalho adicional ainda era requerido para se alcançar um sistema de

indicadores que pudesse ser largamente utilizado para apoiar e encorajar a abordagem por desempenho em projeto e construção de edificações (CRISP PeBBu, 2005).

Outra iniciativa foi o projeto *ENSLIC Building*<sup>10</sup> (2007-2010), financiado pelo EACI<sup>11</sup>, envolvendo várias organizações europeias<sup>12</sup>. Seu objetivo era economizar energia na construção e operação de edificações novas e renovações de edificações existentes, promovendo a utilização de ACV nestes projetos (MALMQVIST et al., 2011), facilitando e encorajando seu uso entre arquitetos, consultores e autoridades locais.

Na sequencia cronológica, ressalta-se o projeto *LoRe-LCA*<sup>13</sup> (2009-2011), coordenado pelo *SINTEF Building and Infrastructure*, com o propósito de *a)* analisar a regulamentação de edificações europeias dirigida ao consumo de recursos na construção, e obter recomendações de políticas relativas à energia, prevenção da poluição, aterro sanitário e resíduos, *b)* comparar métodos de avaliação de desempenho ambiental de diferentes países, com ênfase em ACV, e *c)* apoiar atividades de normatização do CEN TC350<sup>14</sup>, considerando as diferentes abordagens e especificidades locais existentes, contribuindo para harmonização das atividades europeias (BUDAVARI et al., 2011).

Merece destaque o projeto *SuPerBuildings*<sup>15</sup> (2010-2012), um consórcio<sup>16</sup> de organizações europeias, líderes em sustentabilidade e avaliação de edificações, dentro do *7th Framework Programme* patrocinado pela Comissão europeia. O projeto baseou-se na experiência e conhecimento adquiridos em projetos e sistemas de classificação de edificações de países europeus, além de projetos internacionais, redes de pesquisa e grupos de normatização, tais como, CEN TC 350, ISO TC59 SC17<sup>17</sup>, *SB Alliance*<sup>18</sup>, UNEP SBCI<sup>19</sup>, CRISP, PRESCO<sup>20</sup>, LENSE<sup>21</sup> e PERFECTION<sup>22</sup>.

---

<sup>10</sup> *Energy Saving through Promotion of Life Cycle Analysis in Building*

<sup>11</sup> *Executive Agency for Competitiveness and Innovation*

<sup>12</sup> *Fundación CIRCE – Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos; ARMINES- Centre for Energy and Processes, Ecole des Mines de Paris; KHT- Royal Institute of Technology, Sweden. Department of Urban Studies School of Architecture and the Built Environment; IFZ - Inter-University Research Centre for Technology, Work and Culture, Graz, Austria; EMI - Non-profit Company for Quality Control and Innovation in Building, Hungria; SEC - Sofia Energy Centre, Bulgária; CalCon Holding GmbH, Alemanha; ECOFYS; SINTEF – instituto de pesquisa norueguês.*

<sup>13</sup> *Low Resource consumption buildings and constructions by use of LCA in design and decision making –FP7 (2009-2011)*

<sup>14</sup> *CEN – Comité européen de normalisation - TC350, Sustainability of construction works*

<sup>15</sup> *Sustainability and Performance Assessment and Benchmarking of Buildings*

<sup>16</sup> *Formado por VTT Technical Research Centre of Finland; BRE Global Ltd; Centre Scientifique et Technique du Bâtiment; Karlsruhe Institute of Technology; W/E Consultants, dentre outros.*

<sup>17</sup> *ISO Technical Committee - Sustainability in buildings and civil engineering works*

<sup>18</sup> *Sustainable Building Alliance*

<sup>19</sup> *United Nations Environment Programme - Sustainable Building Construction Initiative*

<sup>20</sup> *European thematic network on Practical Recommendations for Sustainable Construction (2000-2004)*

Sob a coordenação do VTT (*Technical Research Centre of Finland*), o projeto *SuPerBuildings* desenvolveu e selecionou indicadores de sustentabilidade para edificações com foco especial na sua validação e confiabilidade. *SuPerBuildings* desenvolveu, também, uma maior compreensão sobre os níveis de desempenho na Europa e recomendações para o uso efetivo de indicadores nos diferentes estágios do projeto de edificações (HÄKKINEN et al., 2012).

Desenvolvido em paralelo e com a cooperação do *SuPerBuildings*, o projeto *OPEN HOUSE* (2010-2013) conta com a contribuição equilibrada de grandes companhias com forte capacidade de pesquisa, empresas de alta tecnologia, instituições de pesquisa, desenvolvedores de políticas públicas e usuários finais. Seu foco é desenvolver e testar metodologias de avaliação por meio de estudos de casos (HÄKKINEN et al., 2012). Os resultados da avaliação-piloto por meio da aplicação de 56 indicadores de sustentabilidade propostos na metodologia *OPEN HOUSE* a 68 estudos de casos em 25 países europeus, foi divulgado em workshop paralelo à conferência *SBI3Munich*, na Alemanha, em abril de 2013 (OPENHOUSE, 2013).

Outra iniciativa com a finalidade de encontrar e unificar métricas para avaliar o desempenho de edificações foi o projeto intitulado “*Piloting SBA Common Metrics*”, desenvolvido pela SBA - *Sustainable Building Alliance*, criada em 2008 (HANS et al., 2012). Um grupo de trabalho<sup>23</sup> da SBA preparou, em 2009 e 2010, uma primeira versão de um quadro de indicadores e suas métricas para serem calculados considerando os mesmos parâmetros e estágios e informados de maneira unificada na avaliação das edificações, visando integrá-los aos sistemas de certificação existentes para permitir comparações de edificações mundialmente (CROWHURST et al., 2010).

Entre 2011 e 2012, o quadro de indicadores foi testado dentro de sistemas de avaliação, para verificar sua viabilidade, aplicabilidade e comparabilidade, identificando potenciais melhorias a implementar em projetos reais (HANS et al., 2012).

Ainda no âmbito da SBA, o projeto *Green Impact* (2011-2012) objetivou preencher a lacuna existente entre o referido conjunto de indicadores-chave e a avaliação do desempenho econômico de edificações sustentáveis, além de definir e obter consenso quanto a indicadores de desempenho e valores de referencia aplicáveis ao ambiente construído (PONCE et al., 2012).

---

<sup>21</sup> *Methodology Development towards a Label for Environmental, Social and Economic Buildings* (2006-2008)

<sup>22</sup> *Performance indicators for health, comfort and safety of the indoor environment – FP7* (2009-2011)

<sup>23</sup> Formado por: BRE, CSTB, DGNB, QUALITEL e VTT)

Finalmente, destaca-se o projeto *PERFECTION*, de 2009 a 2011, desenvolvido dentro do *7th Framework Programme*, com o objetivo de desenvolver um *framework* de indicadores referentes à qualidade do ambiente interno das edificações, priorizando conforto, segurança e saúde, acessibilidade, estimulação positiva dos usuários e sustentabilidade. Almejou, em longo prazo, ajudar na aplicação de novas tecnologias e métodos de projeto de edificações para minimizar o impacto do ambiente interno construído no bem-estar dos usuários.

O apêndice A resume os principais centros de referência, de âmbito mundial, sobre indicadores, e destaca as principais iniciativas, organizações e países envolvidos e os principais documentos produzidos sobre indicadores para a construção sustentável.

### **1.3 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE PARA PESQUISA**

A hipótese de trabalho desta pesquisa é a de que *um conjunto de indicadores é capaz de integrar aspectos fundamentais de sustentabilidade à tomada de decisão, e diferenciar alternativas de sistema estrutural em concreto por seu desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico no ciclo de vida da edificação.*

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é *a verificação da hipótese de trabalho, pela proposição de um conjunto de indicadores relevantes e mensuráveis, capazes de quantificar o desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico no ciclo de vida de sistemas estruturais em concreto armado e protendido de edificações de tipologia vertical, e desta forma, considerar aspectos importantes de sustentabilidade na sua definição.*

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

Para que o objetivo principal seja alcançado, deverão ser também atingidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Definir os requisitos de desempenho atribuídos ao sistema estrutural e propor indicadores associados a eles;
- 2) Definir parâmetros que influenciem o desempenho dos sistemas estruturais de concreto e que possam interferir na seleção de indicadores;

- 3) Verificar a possibilidade do pavimento-tipo representar o desempenho de toda a superestrutura da edificação nas diferentes dimensões analisadas, reduzindo o volume de dados a serem levantados e tratados para o cálculo e análise dos indicadores propostos, analogamente à prática comum de projeto estrutural, que considera os índices de consumo material do pavimento-tipo como representativo de toda a superestrutura;
- 4) Verificar a premissa de que não há variação significativa entre as tipologias residencial e comercial (no caso, escritórios e hotéis), tendo em vista que, (a) as cargas acidentais e permanentes têm mesma ordem de grandeza; (b) a concepção atual favorece vãos maiores e a quase inexistência de vigas (exceto nas caixas de escada e poços de elevadores), com vãos definidos apenas pelo espaçamento entre pilares; e (c) a demanda crescente por maior número de vagas por apartamento aproxima as duas tipologias com relação aos pavimentos de garagem.

A tipologia *edificações verticais residenciais e comerciais em concreto*, foi selecionada por duas razões principais:

- 1) Edificações residenciais são o produto de maior peso individual da indústria da construção no Brasil. O segmento de obras residenciais executou construções no valor de 51,7 bilhões, correspondendo a 22,0% do total das incorporações, obras e/ou serviços da construção em 2011. Essa participação deve-se, sobretudo ao resultado de edificações residenciais, que correspondeu a R\$ 44,2 bilhões, em 2011 (IBGE PAIC 2011).
- 2) O consumo nacional de cimento e a produção nacional de aços laminados longos, ambos em toneladas, são os principais indicadores da construção civil (CBIC, 2011), o que atesta a predominância das construções em concreto armado no país. O consumo de concreto e vergalhões no país, no ano de 2011, foi de R\$5,35 bilhões de reais e R\$4,15 bilhões de reais, respectivamente (IBGE PAIC 2011).

As concepções estruturais escolhidas - sistemas estruturais em concreto armado e misto (concreto armado com lajes protendidas) - se justificam pelo fato de representarem, atualmente, os sistemas mais utilizados pelas construtoras capixabas para as tipologias residencial e comercial, conforme depoimento de empreendedores e engenheiros responsáveis pelos projetos estruturais dos estudos de caso. Portanto, foram escolhidos por exemplificarem a prática usual destas tipologias.

## **1.5 ESTRUTURA DA TESE**

O desenvolvimento proposto para a tese seguiu o fluxograma de etapas ilustradas na Figura 1.2, que as associa aos capítulos correspondentes.

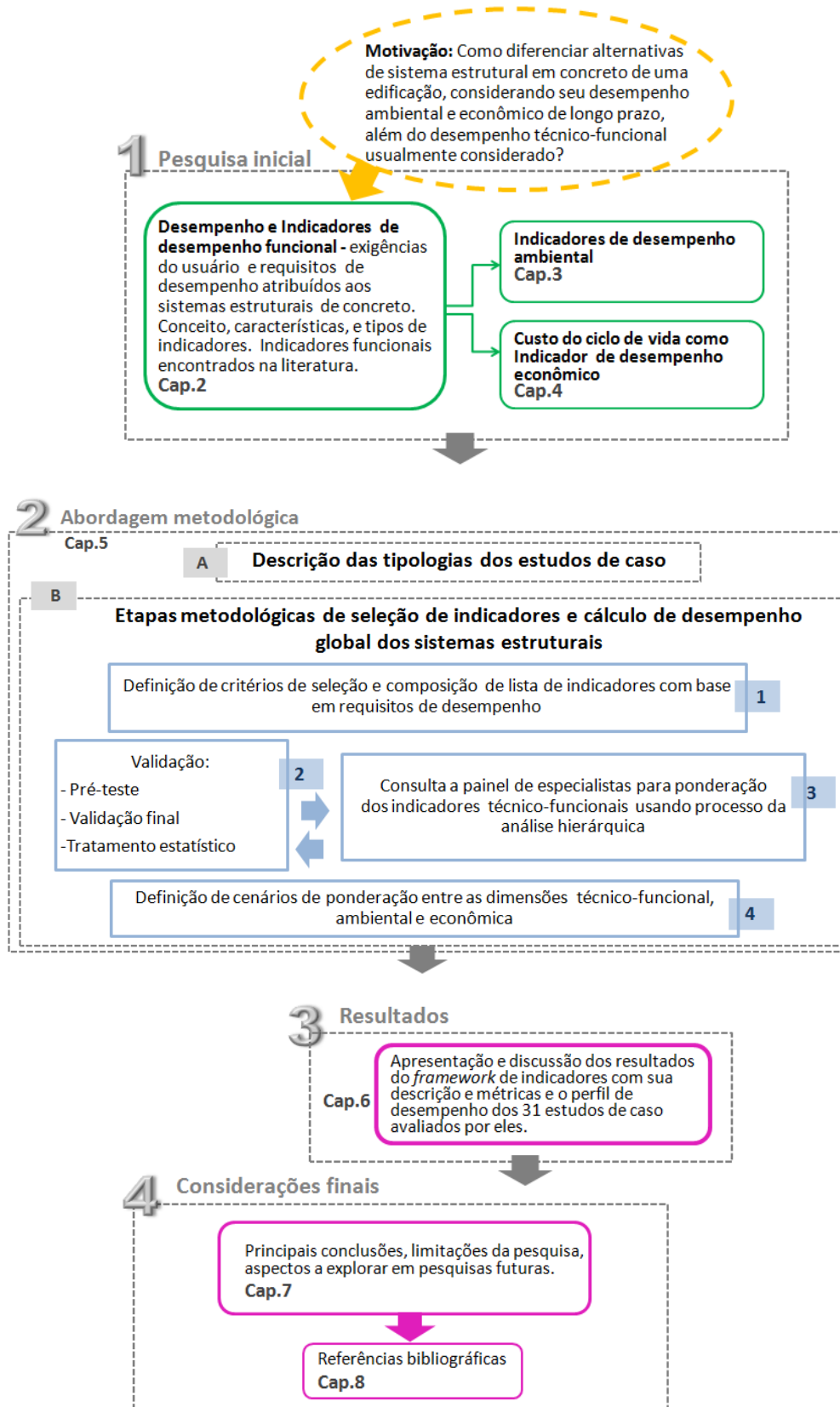


Figura 1.2 - Fluxograma das etapas do desenvolvimento desta pesquisa



Este *Capítulo 1* contém a introdução, onde são apresentados a justificativa, os principais objetivos, a hipótese a ser investigada, principais iniciativas e centros de referência no tema, nacionais e internacionais, um fluxograma das etapas previstas para o desenvolvimento da pesquisa, além de sua organização em capítulos.

O *Capítulo 2* aborda uma revisão bibliográfica sobre desempenho e indicadores funcionais de sistemas estruturais envolvendo conceitos, tipos e características de indicadores. São discutidos o conceito de desempenho, exigências dos usuários da edificação e requisitos de desempenho correspondentes, com o objetivo de nortear a escolha dos indicadores que representem o desempenho de sistemas estruturais em concreto, com base nas normas de desempenho ISO 6240:1980, ISO 6241: 1984, ISO 9699: 1994 e ABNT NBR 15575:2013. Deste modo, são considerados: segurança (estrutural e contra incêndio); manutenibilidade; durabilidade; adaptabilidade ao uso e construtibilidade.

Os indicadores ambientais associados ao requisito de adequação ambiental de sistemas estruturais em concreto (exigência de *sustentabilidade* da ABNT NBR 15575:2013) são apresentados no *Capítulo 3*. Nele, são discutidos indicadores para uso de recursos (associados a aspectos ambientais) e indicadores para impactos ambientais (associados a categorias de impacto das ACV) com base na EN 15643-2:2011 e na EN 15804:2012.

Dentre os principais indicadores econômicos do sistema estrutural encontrados na literatura, o único capaz de avaliar custos na perspectiva de longo prazo é o custo do ciclo de vida (CCV). Em virtude disso, foi escolhido nesta tese, como indicador de sistemas estruturais para o requisito de economia, sendo abordado no *Capítulo 4*, juntamente com seu método de cálculo (ACCV) e considerações sobre os demais indicadores econômicos.

A abordagem metodológica para condução da pesquisa é apresentada no *Capítulo 5*, que detalha as etapas desenvolvidas. A apresentação e discussão dos resultados, por sua vez, são tratadas no *Capítulo 6*, que apresenta o conjunto de indicadores contendo sua descrição e métricas, os resultados individuais, as medianas dos resultados de cada indicador para os 31 casos estudados, e os perfis de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico dos estudos de caso obtidos com os resultados normalizados dos indicadores. O desempenho ponderado de cada dimensão de sustentabilidade abordada na pesquisa é apresentado, assim como o desempenho global obtido com diferentes cenários de ponderação entre as dimensões consideradas.

Ao *Capítulo 7* é reservada a apresentação das principais conclusões, limitações da pesquisa, aspectos a explorar em pesquisa futuras. Finalmente, as referências bibliográficas utilizadas na tese estão listadas no *Capítulo 8*.

Além destes, o *Apêndice A* traz uma síntese dos principais centros de referência, iniciativas, organizações, países envolvidos e documentos produzidos sobre indicadores para a construção sustentável e o *Apêndice B* detalha a análise estatística dos resultados dos indicadores calculados para os estudos de caso.



## 2 DESEMPENHO E INDICADORES DE DESEMPENHO FUNCIONAL

### 2.1 INTRODUÇÃO

O conceito de desempenho surgiu no final dos anos 60, no período pós-guerra, com a função de avaliar e sistematizar a variedade de novos produtos, técnicas e sistemas construtivos desenvolvidos visando à reconstrução dos países atingidos pela guerra. Tinha o propósito de evitar manifestações patológicas na construção, decorrentes da utilização de novas tecnologias sem avaliação prévia.

As primeiras instituições a abordarem esse assunto foram o RILEM<sup>24</sup>, a ASTM<sup>25</sup> e o CIB<sup>26</sup>. Posteriormente, mais uma instituição aderiu a esse grupo, a ISO<sup>27</sup> (BONIM, 1998; MITIDIERI, 1998; CASER, 2000). No Brasil, o IPT e a ABNT são as instituições que mais têm se dedicado a difundir o tema, sistematizando requisitos e critérios de desempenho para materiais e sistemas de construção (CASER, 2000).

O significado da palavra desempenho, aplicado à construção civil, é “*comportamento em utilização*” e caracteriza a necessidade de um produto apresentar certas propriedades, que o capacitem a cumprir sua função, quando sujeito a determinadas condições de exposição (CIB, 1982; SOUZA, 1988; MITIDIERI, 1998; ABNT NBR 15575-1: 2013).

Embora a preocupação com critérios de desempenho na construção seja uma tendência mundial, no Brasil, ela ainda é embrionária. Por exemplo, toda a normatização técnica brasileira vigente referente à construção civil é prescritiva, ou seja, tem a preocupação quanto à forma (meio) com que o produto deve ser construído, e não com o desempenho esperado do produto ou sistema (BORGES; SABBATINI, 2008).

---

<sup>24</sup> Sigla de origem francesa (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) para a União internacional de laboratórios e especialistas em materiais de construção, sistemas e estruturas, fundada em 1947, com a missão de promover cooperação científica na área de materiais de construção e estruturas.

<sup>25</sup> Órgão americano de normatização de vários materiais, produtos, sistemas e serviços, (American Society for Testing and Materials) fundado em 1898.

<sup>26</sup> Sigla de origem francesa (*Conceil Internationale du Bâtiment*) para Conselho internacional para pesquisa e inovação em edifícios e construção.

<sup>27</sup> Organização internacional para padronização (*International Organization for Standardization*) fundada em 1947 na Suíça.

Da mesma forma e não apenas no Brasil, particularizando-se para as especificações de concreto, a maioria delas é predominantemente prescritiva, com alguns aspectos de desempenho. No entanto, há um consenso de que essa realidade deve ser mudada visando a um aumento da vida útil das estruturas (TANESI et al., 2010). Ademais, novos materiais e novos métodos de recuperação de estruturas em concreto estão sendo desenvolvidos mais rapidamente do que está sendo obtida a experiência em seu desempenho (ANDRADE; MARTÍNEZ, 2009).

De fato, a migração da abordagem prescritiva para a abordagem de desempenho é um desafio, uma vez que exige mudança na forma como os projetistas concebem o produto e conhecimento do comportamento em uso das soluções de projeto (BORGES; SABATINI, 2008). Especialmente no Brasil, os projetistas não possuem formação, tampouco têm tradição em projetar utilizando a abordagem de desempenho. Para atingir esse objetivo, é necessária uma forte interação entre membros da equipe durante todo o processo de projeto, pois muitas soluções podem exigir um caráter multidisciplinar (HOPFE, 2009; TANESI et al, 2010).

Além da evolução dos projetistas, a aplicação do conceito de desempenho na construção ainda depende de outros fatores, incluindo a formação e a capacitação de demais profissionais envolvidos, gestores e mão de obra, adequação da legislação e normas e adequação da cadeia de fornecedores.

Com base em especificações adotadas em outros países, modelagem matemática e trabalhos experimentais, Tanesi e outros (2012) apresentaram diretrizes para a criação de especificações por desempenho de concretos, com sugestões para os requisitos de desempenho, bem como os aspectos estratégicos, táticos e operacionais de sua implementação no Brasil. Incluíram, igualmente, sugestões para a modificação das especificações e normas brasileiras a fim de que sigam a tendência mundial e passem de prescrição ao desempenho (TANESI et al., 2012).

Nesse cenário, mesmo com eventuais críticas e necessidade de melhorias, há que se considerar a importância da proposição da ABNT NBR 15575:2013 - *Edificações habitacionais – Desempenho*, publicada em fevereiro último, para vigorar a partir de 19 de julho de 2013. Ela é composta de seis partes: (1) requisitos gerais; (2) requisitos para os sistemas estruturais; (3) requisitos para os sistemas de pisos internos; (4) requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas; (5) requisitos para os sistemas de cobertura; e (6) requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Para os efeitos da ABNT NBR 15575-1:2013, requisitos de desempenho são condições que expressam qualitativamente os atributos que o edifício habitacional e seus sistemas devem possuir para satisfazer as exigências dos usuários, enquanto critérios de desempenho são especificações quantitativas dos requisitos de desempenho, expressos em termos de quantidades mensuráveis, para que possam ser objetivamente determinados.

Os requisitos e critérios a serem atendidos pelas edificações são definidos a partir de uma lista geral de exigências dos usuários, referentes à *segurança*, *habitabilidade*, *sustentabilidade* e *nível de desempenho*. As exigências referentes (1) à *segurança* são expressas por segurança estrutural, contra incêndio, e no uso e operação; (2) à *habitabilidade* são expressas por estanqueidade, desempenho térmico, desempenho acústico, desempenho lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico; (3) à *sustentabilidade*, são expressas por durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental; e (4) ao *nível de desempenho* são expressas em desempenho mínimo, intermediário e superior (ABNT NBR 15575-1:2013).

Os requisitos e critérios correspondentes à exigência de *habitabilidade* previstos na Norma ABNT NBR 15575-1: 2013 não serão abordados devido ao entendimento de que sejam mais adequadamente supridos por outros subsistemas construtivos, sendo, por esta razão, considerados não pertinentes ao sistema estrutural.

Das normas ISO 6240:1980, ISO 6241:1984, ISO 9699:1994 e ABNT NBR 15575:2013 são extraídos os requisitos de desempenho pertinentes ao sistema estrutural, quais sejam, requisitos de: segurança (estrutural e contra incêndio); manutenibilidade; durabilidade; adequação ambiental; adaptabilidade ao uso; construtibilidade e economia. Pesquisas recentes, referentes ao sistema estrutural em concreto de obras civis, mostram a importância em avaliar e prever o grau de segurança da estrutura para monitorar o atendimento à vida útil de projeto e definir o programa de manutenção e/ou de reparos, com menor custo do ciclo de vida (ANDRADE; MARTÍNEZ, 2009; NOGUEIRA; LEONEL, 2013).

Com relação ao requisito de adequação ambiental, os indicadores ambientais propostos serão abordados no capítulo 3, e para o requisito de economia, os indicadores econômicos pesquisados na literatura são discutidos no capítulo 4. Para os demais requisitos de desempenho, os potenciais indicadores funcionais encontrados na literatura são discutidos a seguir, neste capítulo.

## 2.2 REQUISITOS DE DESEMPENHO DO SISTEMA ESTRUTURAL

### 2.2.1 Requisitos de desempenho correspondentes às exigências do usuário quanto à segurança

A ABNT NBR 6118:2007 – *Projetos de estruturas de concreto – Procedimento*, estabelece requisitos gerais de qualidade da estrutura, já considerando a estrutura como um todo e dando ênfase a sua durabilidade. Subdivididos em três grupos, estes requisitos são relativos a capacidade resistente, a um bom desempenho em serviço e a durabilidade da estrutura de concreto.

Referindo-se à ABNT NBR 15575-1:2013, o Quadro 2.1 apresenta as exigências dos usuários quanto à segurança, e seus requisitos e critérios correspondentes.

**Quadro 2.1 - Exigências dos usuários quanto à segurança, e seus requisitos e critérios correspondentes (ABNT NBR 15575-1: 2013).**

Exigências do usuário		Requisitos de desempenho	Critérios de desempenho
Segurança	Estrutural	Estabilidade e resistência estrutural *	▪ Estado limite último.
		Deformações, fissurações e ocorrência de outras falhas *	▪ Estado limite de utilização.
	Contra incêndio	Dificultar o princípio de incêndio	▪ Proteção contra descargas atmosféricas; ▪ Proteção contra risco de ignição nas instalações elétricas; ▪ Proteção contra risco de vazamentos nas instalações de gás;
		Facilitar a fuga em caso de incêndio	▪ Rotas de fuga
		Dificultar a inflamação generalizada	▪ Propagação superficial de chamas
		Dificultar a propagação do incêndio	▪ Isolamento de risco à distancia; ▪ Isolamento de risco por proteção; ▪ Assegurar estanqueidade e isolamento.
		Segurança estrutural *	▪ Minimizar o risco de colapso estrutural.
		Sistema de extinção e sinalização de incêndio	▪ Equipamentos de extinção, sinalização e iluminação de emergência.
	No uso e operação	Segurança na utilização do imóvel	▪ Segurança na utilização dos sistemas
		Segurança das instalações	▪ Segurança na utilização das instalações

\* Requisitos específicos do sistema estrutural

#### 2.2.1.1. Segurança estrutural

De acordo com a ABNT NBR 8681:2004, os estados-limites de uma estrutura estabelecem as condições a partir das quais ela apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção.

O manual do proprietário, ou documento similar (ABNT NBR 14037:2011), deve conter as informações relativas às sobrecargas limitantes no uso das edificações.

Devem ser considerados em projeto os estados-limites últimos caracterizados por:

- *Perda do equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido;*
- *Ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais;*
- *Transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático;*
- *Instabilidade por deformação;*
- *Instabilidade dinâmica.*

Em casos particulares, pode ser necessário considerar outros estados-limites últimos, conforme as Normas Brasileiras específicas de projeto estrutural. Também devem ser previstas nos projetos, considerações sobre as condições de agressividade do solo, do ar e da água na época do projeto, prevendo-se as proteções aos sistemas estruturais e suas partes. Por fim, devem-se circunscrever as deformações resultantes das cargas de serviço e as deformações impostas ao edifício ou sistema, a valores que não causem prejuízos ao desempenho de outros sistemas e não causem comprometimento da durabilidade da estrutura.

#### **2.2.1.2 Segurança contra incêndio**

No panorama atual, sabe-se que consideração de segurança contra incêndio deve ser intrínseca a qualquer novo produto ou tecnologia desenvolvida para promover a construção sustentável. Soluções aceitáveis para problemas agudos de segurança contra incêndio não devem constituir uma ameaça para a saúde a longo prazo de trabalhadores, bombeiros ou o público em geral (KRAUSE et al., 2012).

Krause e outros (2012) levantaram questões sobre o desempenho contra incêndio de novos produtos, materiais e tecnologias, associados ao movimento em direção à sustentabilidade, reconhecendo, no entanto, que há questões a serem investigadas, que confrontam o projeto seguro contra incêndio de edificações com estratégias de iluminação e ventilação natural, tecnologias de fachada inteligente, redução de água, controles inteligentes para a edificação, sistemas estruturais mistos mais leves, ou sistemas estruturais que utilizam novos concretos de alta resistência ou alto desempenho fabricados com cinza volante, em que há risco de perderem sua capacidade resistente mais rapidamente que os sistemas em concreto convencional, devido a destacamentos excessivos, se medidas apropriadas não são tomadas.

Em virtude disso, concluíram pela necessidade de uma abordagem integrada baseada no conhecimento, para avaliar os prós e contras da aplicação de materiais renováveis, tecnologias de construção sustentáveis e novas tecnologias energéticas para edificações, que preserve a segurança contra incêndios (KRAUSE et al., 2012).

As exigências da ABNT NBR 15575:2013 são pautadas em baixa probabilidade de início de incêndio; alta probabilidade dos usuários sobreviverem sem sofrer qualquer injúria; e reduzida extensão de danos à propriedade e à vizinhança imediata ao local de origem do incêndio. Para atender as exigências do usuário quanto à segurança específica de sistemas estruturais em concreto, devem ser cumpridos os requisitos estabelecidos nas ABNT NBR 15200:2004 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento, e ABNT NBR 14432:2001 - Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento.

### **2.2.1.3 Segurança no uso e operação**

A segurança no uso e operação dos sistemas e componentes do edifício habitacional deve ser considerada em projeto, especialmente a que diz respeito a agentes agressivos (proteção contra queimaduras e pontos e bordas cortantes, por exemplo), devendo ser previstas formas de minimizar o risco de acidentes, devidos, por exemplo, (i) a quedas de pessoas de quaisquer partes elevadas da construção, evitando acessos não controlados aos riscos de queda, e rupturas das proteções; (ii) a irregularidades nos pisos, rampas e escadas, conforme a ABNT NBR 15575-3: 2012; (iii) à ruptura de subsistemas ou componentes, resultando em partes cortantes ou perfurantes; (iv) à dessolidarização ou projeção de materiais das coberturas e fachadas; e (v) à explosão resultante de vazamento ou de confinamento de gás combustível.

### **2.2.2 Requisitos de desempenho correspondentes às exigências do usuário quanto à sustentabilidade**

A sustentabilidade é expressa na ABNT NBR 15575-1: 2013 por meio dos seguintes requisitos de desempenho (ou fatores de desempenho, segundo a notação desta Norma): *durabilidade*, *manutenibilidade* e *adequação ambiental*, conforme mostra o Quadro 2.2.



**Quadro 2.2 - Exigências dos usuários quanto à sustentabilidade, requisitos e critérios de desempenho correspondentes (ABNT NBR 15575-1: 2013)**

Exigência	Fatores* de desempenho	Requisitos de desempenho	Critérios de desempenho	
Sustentabilidade	<b>Durabilidade</b>	Durabilidade da edificação e dos sistemas que a compõem.	Vida útil. Durabilidade.	
	<b>Manutenibilidade</b>	Manutenibilidade da edificação e de seus sistemas.	Facilidade ou meios de acesso.	
	<b>Adequação ambiental</b>	<p>Obs 1: técnicas de avaliação do impacto ambiental resultante das atividades da cadeia produtiva da construção ainda são objeto de pesquisa e, no atual estado da arte, não é possível estabelecer critérios e métodos de avaliação relacionados à expressão desse impacto.</p> <p>Obs 2: de forma geral, os empreendimentos e sua infraestrutura devem ser projetados, construídos e mantidos de forma a minimizar as alterações no ambiente.</p> <p>Obs 3: A ABNT NBR 15575-6:2013 estabelece requisitos relativos ao consumo de água e à deposição de efluentes sanitários.</p>		
		<b>Projeto e implantação de empreendimentos:</b> considerar os riscos de desconfinamento do solo, deslizamentos de taludes, enchentes, erosões, assoreamento de vales ou cursos d'água, lançamentos de esgoto a céu aberto, contaminação do solo ou da água por efluentes ou outras substâncias, e outros riscos similares.		
		<p><b>Seleção e consumo de materiais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ explorar e consumir de modo racional os recursos naturais; privilegiar materiais com menor impacto ambiental, desde as fases de exploração dos recursos naturais à sua utilização final;</li> <li>▪ utilizar madeiras de origem comprovada: certificação legal ou de manejo aprovado por órgãos ambientais;</li> <li>▪ recorrer ao uso de madeiras que não estejam em extinção (anexo F da Norma)</li> <li>▪ implementar gestão de resíduos no canteiro de obras, minimizando sua geração, e possibilitando segregação para facilitar reuso, reciclagem ou disposição final em local específico;</li> <li>▪ avaliar junto aos fabricantes, os resultados de inventários de ciclo de vida dos produtos para subsidiar a tomada de decisão na avaliação do impacto destes elementos no meio ambiente.</li> </ul>		
		<p><b>Consumo de água e deposição de efluentes no uso e ocupação da habitação:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instalações que minimizem consumo de água, possibilitem reuso, reduzindo demanda de água da rede pública e volume de esgoto para tratamento, mantendo satisfação do usuário e sem aumentar ocorrência de doenças.</li> <li>▪ Águas servidas devem ser encaminhadas às redes públicas de coleta, e na indisponibilidade destas, utilizar sistemas que evitem contaminação do ambiente local.</li> </ul>		
<p><b>Consumo de energia no uso e ocupação da habitação:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instalações que minimizem o consumo de energia, p.ex., iluminação e ventilação natural e sistemas de aquecimento baseados em energia alternativa.</li> <li>▪ Aplicar também aos aparelhos e equipamentos utilizados na execução da obra e no uso do imóvel (guinchos, serras, guias, aparelhos de iluminação, eletrodomésticos, elevadores, sistemas de refrigeração, dentre outros).</li> </ul>				

\*Em uma comparação entre a terminologia das Normas ISO 6241:1984 e ABNT NBR 15575-1:2013, pode-se considerar *fatores de desempenho* (termo inexistente na ISO), como requisitos de desempenho agrupados por assunto.

### 2.2.2.1. Durabilidade

Embora a maioria das normas internacionais de concreto tenha sido atualizada várias vezes nos últimos anos, suas especificações atuais para durabilidade do concreto ainda têm como base, quase que exclusivamente, os requisitos tradicionais para a composição do concreto,

procedimentos de construção e condições de cura, cuja aplicação tem se mostrado insuficiente e produzido resultados insatisfatórios (JUNG et al., 2013).

Abordagens com base em desempenho para melhorar a durabilidade do concreto vêm se consolidando recentemente (BAROGHEL-BOUNY, 2004; ALEXANDER et al., 2008; KANELLOPOULOS et al., 2012; NGANGA et al., 2013), por meio de indicadores de durabilidade. Para avaliação da vida útil de concretos auto adensáveis, em uma comparação com concretos vibrados normalmente, ambos com resistências características de 20 a 45 MPa, por exemplo, foram considerados os indicadores, absorção de água, resistência à carbonatação, resistência à corrosão induzida por cloretos (SIDERIS; ANAGNOSTOPOULOS, 2013), taxa de sucção capilar (usada para cálculo da absorção de água), porosidade e permeabilidade aos íons cloreto (KANELLOPOULOS et al., 2012).

No entanto, as variações aleatórias nas propriedades físicas do concreto ou no seu cobrimento, devido às incertezas associadas a sua qualidade e condições de exposição, não foram ainda explicitamente consideradas nessas abordagens (DEBY et al., 2009). Por outro lado, muitos métodos probabilísticos têm sido ultimamente propostos para a avaliação de vida útil (KWON et al., 2009; DEBY et al., 2009; SHI et al., 2012).

A especificação por desempenho para o concreto, na tendência que vem se fortalecendo em escala mundial, requer o uso de modelagem matemática dos mecanismos de deterioração para estimar a vida útil da estrutura, com o objetivo de garantir a vida útil de projeto sob condições específicas de exposição, dentre outras estratégias (KWON et al., 2009; DEBY et al., 2009; TANESI, 2010; SHI et al., 2012; MULLER et al., 2013).

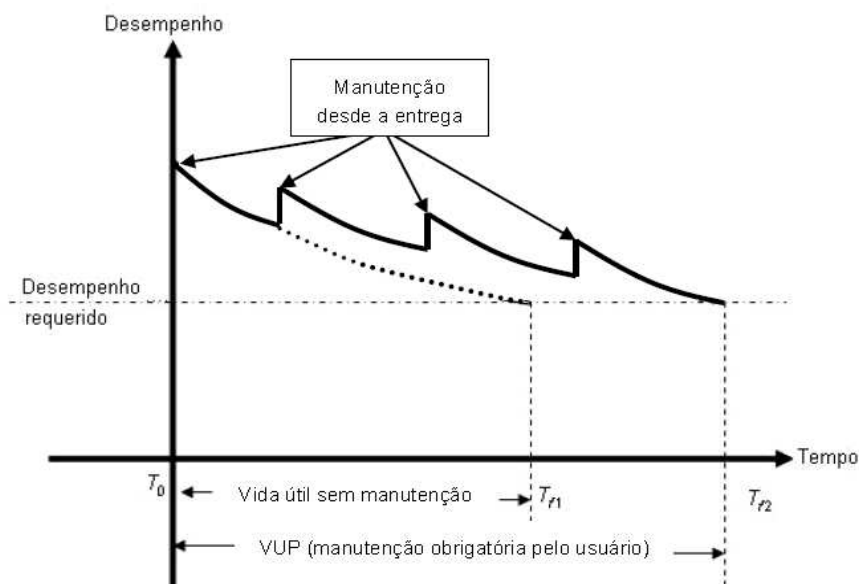
A especificação de critérios de desempenho que não tenham sido determinados por meio de modelos matemáticos para prever a vida útil da estrutura não constitui uma especificação por desempenho, mas sim, híbrida. Isto porque, como ocorre com as especificações prescritivas, os critérios tornam-se subjetivos e não necessariamente associados a uma determinada vida útil ou desempenho ao longo do tempo (TANESI, 2010).

Segundo a norma brasileira de desempenho, a durabilidade do edifício e de seus sistemas é uma exigência econômica do usuário, porquanto está diretamente associada ao custo global do bem imóvel. A durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe foram atribuídas, quer seja pela deterioração que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional (ABNT NBR 15575-1: 2013).

De acordo com a ABNT NBR 15575-1: 2013 - Anexo C, o período de tempo compreendido entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário pré-estabelecidas é denominado vida útil (*service life*). A vida útil (VU), portanto, é uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes. A vida útil de projeto (VUP) (*design life*), é uma manifestação do desejo do usuário, expresso previamente, do quanto ele acha razoável que deva durar o bem que irá usufruir se adquiri-lo.

Conceitua-se a vida útil estimada (VUE) (*predicted service life*) para o sistema estrutural em concreto, como sendo a durabilidade inferida a partir de dados históricos de seu desempenho, ensaios de envelhecimento acelerado (ABNT NBR 15575-1: 2013 - Anexo C), ou ainda, aplicação de modelos matemáticos para verificação da vida útil com base em mecanismos de deterioração (ISO DIS 16204:2012). No caso do sistema estrutural, a VUE pode ser normalmente prolongada por meio de ações de manutenção. Na Figura 2.1 este comportamento está esquematizado (ABNT NBR 15575-1: 2013 - Anexo C).

O agente que define a VUP deve também estabelecer as ações de manutenção a serem realizadas para garantir o seu atendimento. É necessário salientar a importância da realização integral das ações de manutenção pelo usuário, sem a qual corre-se o risco de a VUP não ser atingida (ABNT NBR 15575-1: 2013 - Anexo C).



**Figura 2.1 - Desempenho ao longo do tempo (ABNT NBR 15575-1: 2013 - Anexo C).**

O impacto da VU no custo global é fator determinante para definição da durabilidade requerida. O estabelecimento da VU é, conceitualmente, resultado do processo de otimização do custo

global. O sistema de menor custo global não é normalmente o de menor custo inicial nem o de maior durabilidade; é um dos sistemas intermediários. Assim, considerando-se tanto as limitações de recursos da sociedade de investimento na infraestrutura habitacional do País, quanto às necessidades de proteção básica do usuário, é que se estabelece, na ABNT NBR 15575-1: 2013, o conceito de VU mínima.

A ABNT NBR 15575-1:2013 propõe uma classificação da VUP em três níveis (mínimo, intermediário e superior) conforme mostrado no Quadro 2.3 para os vários subsistemas que compõem as edificações.

**Quadro 2.3 - Prazos de Vida útil de projeto, VUP (Anexo C, ABNT NBR 15575-1:2013;CBIC, 2013)**

Sistema construtivo	VUP (anos) ABNT NBR 15575-1: 2013		
	Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 63	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a ABNT NBR 5674 e especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à ABNT NBR 14037.			

A redução de desempenho inicial do sistema construtivo pode ser controlada com medidas de projeto juntamente com operações de manutenção durante a vida útil da construção. Essas atividades tendem a ser repetitivas e cíclicas, justificando a criação de um programa de manutenção que permita a otimização dos recursos físicos e financeiros (CREMONINI, 1998). A norma brasileira que fixa os procedimentos de orientação para organização de um sistema de manutenção de edificações é a ABNT NBR 5674:1999.

A ABNT NBR 15575-1:2013 indica a análise do projeto como método de avaliação da durabilidade. Nela, a avaliação do atendimento à VUP pode ser realizada pela utilização da metodologia proposta pelas normas<sup>28</sup> ISO 15686-1: 2000 a 15686-3: 2002 e ISO 15686-5: 2008 a ISO 15686-07: 2008. A ABNT NBR 15575-1:2013 ainda permite que a avaliação da VUP de qualquer um dos sistemas ou da edificação possa ser substituída pela asseguarção por uma terceira parte (companhia de seguros), do desempenho deles durante a vida útil requerida.

<sup>28</sup> Ressalta-se a publicação da ISO 15686-10: 2010 - *Buildings and constructed assets -- Service life planning -- Part 10: When to assess functional performance.*

### **2.2.2.2 Manutenibilidade**

A manutenibilidade consiste em manter a capacidade do edifício e de seus sistemas e permitir ou favorecer as inspeções prediais, bem como as intervenções de manutenção previstas no manual de operação, uso e manutenção, com os menores custos. Para isto, os projetos devem possibilitar o acesso à inspeção predial por meio de suportes para fixação de andaimes, balancins ou outro meio que possibilite a realização da manutenção (ABNT NBR 15575-1: 2013). A estimativa de vida útil do sistema estrutural é crucial para garantir sua vida útil de projeto e definir o programa de manutenção adequado. Os aspectos econômicos da manutenção serão tratados no capítulo 0.

### **2.2.2.3 Adequação ambiental**

Com o foco em sistemas estruturais em concreto, reconhece-se a importância para a sustentabilidade do setor de construção civil, de se mensurar os impactos ambientais da fabricação do concreto, um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo. No Brasil, somente no ano de 2009, foram produzidos aproximadamente 150 milhões de m<sup>3</sup> de concreto (AGOPYAN; JOHN, 2011). Nesse sentido, vários estudos têm sido conduzidos, com o intuito de melhorar o desempenho ambiental, técnico e econômico de cimentos e concretos (ISAIA; GASTALDINI, 2004; SILVA, 2006; SILVA et al., 2006; SILVA, 2010; TANESI, 2010; VAN DEN HEEDE; BELIE, 2012), assim como a otimização de seu uso nos diversos tipos de estruturas (HABERT, ROUSSEL, 2010; HABERT et al., 2012; HONG et al., 2012; JUNG et al., 2013; MULLER et al., 2013).

Para avaliar a adequação ambiental em relação à implantação de edificações, a ABNT NBR 15575-1:2013 utiliza como base a análise de projetos, dos materiais e dos processos construtivos, visando a sua inteira adequação às características do local da obra, às leis ambientais, portarias ou órgãos federais, estaduais ou municipais (CONAMA, Secretaria de Meio-Ambiente, entre outros). Devem ser evitadas situações que possam trazer riscos ao meio ambiente e à saúde humana, conforme relatado no Quadro 2.2.

Em função das necessidades básicas de segurança, saúde, higiene e economia, a ABNT NBR 15575:2013 estabelece, para os diferentes sistemas construtivos, requisitos mínimos de desempenho (M), que devem ser considerados e atendidos. Considerando a possibilidade de melhoria da qualidade da edificação, com uma análise de valor da relação custo/benefício dos sistemas, são indicados os níveis de desempenho intermediário (I) e superior (S).

Quanto ao nível de desempenho mínimo (M), particularizando para o sistema estrutural, a ABNT NBR 15575-2:2013 estabelece que ele corresponde ao cumprimento dos requisitos de estabilidade e resistência do sistema estrutural e demais elementos com função estrutural, e requisitos de deformações ou estados de fissuração, e de durabilidade e manutenção.

Os materiais utilizados nos sistemas estruturais representam a parcela majoritária de sua carga ambiental, em relação aos impactos decorrentes da técnica construtiva, que, por esta razão, foi desconsiderada neste trabalho. Portanto, a adequação ambiental do sistema estrutural é definida pelos impactos dos materiais nele empregados.

O conceito de ecoeficiência, segundo Calkins (2009), envolve a criação de maior quantidade de bens e serviços com um menor consumo de recursos e menor geração de resíduos e poluição. O conceito reúne as duas dimensões *eco* - de economia e ecologia - para relacionar o valor do produto ou serviço com a influência ambiental. Indicadores de ecoeficiência, por sua vez, são estruturados para capturar o uso de recursos, em termos de produção e consumo, e os consequentes impactos ambientais (UN ST/ESCAP/2561, 2009).

O ciclo de vida de um produto consiste de todos os estágios inerentes à sua existência, com registros que começam com a extração da matéria-prima necessária para sua produção e terminam com a sua disposição final. Com o conhecimento do ciclo de vida dos materiais de construção utilizados na edificação, atenta-se para que sua produção seja feita mediante exploração e consumo racionalizado de recursos naturais com mínima deterioração ambiental e mínimo consumo de água, energia e matérias-primas. (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

A técnica de ACV oferece a base científica para avaliação do desempenho ambiental dos materiais, e sistemas construtivos das edificações, ao avaliar as cargas ambientais de processos, sistemas e produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida (ISO 14040:2006). Isto facilita a contabilização dos impactos associados a um dado produto, assim como a comparação entre produtos e processos (SAADE et al., 2011).

A divulgação dos impactos de cada produto, através das chamadas declarações ambientais de produtos (EPDs), contendo informação padronizada, com base em ACV e verificada por entidades independentes, é uma das principais apostas para estimular a competição pelo desenvolvimento e oferta de materiais mais ecoeficientes, conforme citado por Zabalza e outros (2011), dentro do projeto LoRe-LCA (item 1.2, capítulo 1), em uma avaliação para melhoria do potencial de ecoeficiência dos materiais de construção.

A ABNT NBR 15575-1:2013 ressalta que, além da avaliação dos processos de extração de matérias-primas e produção dos materiais de construção, deve ser verificado o pleno atendimento a leis ambientais, portarias e regulamentos de órgãos federais (DNPM<sup>29</sup>, IBAMA<sup>30</sup>, ANA<sup>31</sup>, entre outros) ou estaduais (Secretarias de Meio-Ambiente, CETESB<sup>32</sup>, entre outros).

### 2.2.3 Requisito correspondente à exigência do usuário quanto à economia

Esta também, é uma categoria entre as exigências do usuário contemplada na Norma ISO 6241:1984 e muito pertinente ao sistema estrutural, uma vez que seu custo representa uma parcela significativa do custo total da edificação, conforme citado no item 1.1.3 do capítulo 1. Os custos de capital, i.é, custos de aquisição, projetos e construção; e os custos de manutenção e de demolição são exemplos de requisitos econômicos citados na referida norma.

Construtoras e projetistas buscam incessantemente reduzir os custos de produção das edificações, quer racionalizando os projetos, quer implantando novas tecnologias construtivas, que muitas vezes, acabam melhorando o desempenho do produto final. No caso do sistema estrutural em concreto, seu custo é função de inúmeras variáveis, o que dificulta o estabelecimento de indicadores simples e confiáveis para defini-lo (BATLOUNI NETO, 2011).

Procurar aumentar a produtividade no canteiro de obras e conseqüentemente, reduzir custos de produção e de mão-de-obra é, na verdade, uma forma de manter a competitividade das empresas de construção (BATLOUNI NETO, 2011). Embora seja essencial para a evolução da engenharia civil, e da construção de edificações, não é suficiente para garantir o desempenho, a qualidade e a otimização dos custos do seu produto final ao longo do seu ciclo de vida. O custo do ciclo de vida (CCV) do sistema estrutural, embora não tão expedito, é o único que contempla todos estes aspectos.

## 2.3 INDICADORES DE DESEMPENHO TÉCNICO-FUNCIONAL

Referindo-se a uma definição mais ampla de desempenho, qual seja, a capacidade da edificação satisfazer os requisitos especificados para ela em toda sua vida útil, Soetanto e outros (2006) entenderam que essa definição engloba vários aspectos da edificação, não se restringindo ao desempenho estrutural *per se*, como rigidez e estabilidade. No curto prazo, a estrutura deve

<sup>29</sup> Departamento Nacional de Produção Mineral

<sup>30</sup> Acrônimo para Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

<sup>31</sup> Acrônimo para Agência Nacional de Águas

<sup>32</sup> Acrônimo para Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

satisfazer a requisitos imediatos, tais como construção executada no prazo e orçamento previstos. A longo prazo, ela deve permitir, por exemplo, o grau de adaptabilidade ao uso determinado pelo cliente, ou ser projetada para demolição e reciclagem com ligações entre elementos projetadas adequadamente. Requisitos e critérios de desempenho foram discutidos sem, no entanto, chegarem à proposição de indicadores (SOETANTO et al., 2006).

### **2.3.1 Requisito correspondente à exigência do usuário quanto à adaptação ao uso**

Apesar de não constar na norma de desempenho nacional, a categoria de exigências do usuário quanto à adaptação ao uso é contemplada na Norma ISO 6241:1984. Dentre os requisitos quanto ao número, tamanho, geometria, subdivisão e inter-relação dos espaços; equipamentos e serviços; adequação do mobiliário; e flexibilidade para diferentes usos, este último foi considerado pertinente ao desempenho funcional de sistemas estruturais e tratado como *adaptabilidade ao uso*.

O sistema estrutural é tipicamente lançado para atender ao projeto arquitetônico, evitando interferência na distribuição dos espaços. Dada a extensão de sua vida útil, seu lançamento deve permitir ainda, a flexibilização da distribuição original, permitindo possíveis mudanças no seu uso ao longo da vida útil da edificação. Embora ainda não seja praticada nas estruturas de concreto no país, a adaptabilidade pode ser contemplada em uma concepção de projeto que vise também à desmontagem, com elementos estruturais pré-fabricados com ligações adequadas ao reuso.

Adaptabilidade relacionada ao desempenho técnico da edificação, pode ser definida como uma mudança física com o propósito de aumentar a flexibilidade ao uso. Modulação, padronização de componentes, acessibilidade à desmontagem e dissociação técnica e funcional são fatores que definem a facilidade de adaptabilidade do sistema estrutural (GIJSBERS et al., 2009).

Analisar e propor parâmetros ao dimensionamento estrutural visando o uso flexível e a capacidade de transformação dos elementos estruturais foi uma abordagem proposta por Gijbers e outros (2009) para minimizar o desequilíbrio entre demanda dos usuários por qualidade e o nível insatisfatório da mesma no estoque de edificações existentes na Holanda. Consideraram, por exemplo, como indicador de desempenho funcional, a relação entre vãos de lajes maciças e alveolares (m) e massa do pavimento por unidade de área ( $\text{kg/m}^2$ ) de edificações verticais (GIJSBERS et al., 2009).



Com a premissa de que qualquer solução para o ambiente construído deve ser adaptável, Geraedts (2009) propôs quatro indicadores de flexibilidade para as edificações, quais sejam, capacidade de partição, de adaptação, de extensão e multifuncionalidade para as partes da edificação, inclusive a estrutura. Cada um deles se subdivide em outros indicadores. Por meio de critérios de avaliação, uma pontuação é atribuída aos indicadores para três níveis de desempenho, que são ponderados e transformados em valores. Estes são associados a uma escala de 1 a 5, que informa o desempenho da edificação ou de seus subsistemas, referente a cada indicador.

Purnell (2011) por sua vez, ao pesquisar como a variação de parâmetros de projeto – vão, altura e cargas – afetam o carbono incorporado dos elementos estruturais e, conseqüentemente, das estruturas, utilizou como indicador funcional a relação entre peso próprio e capacidade de carga residual de vigas, calculada para diferentes vãos e seções transversais correspondentes.

Laeffer e Manke (2008) consideraram três componentes principais do sistema estrutural, através dos quais se pode avaliar e realizar o reuso de edificações existentes: a superestrutura, o pavimento no nível do subsolo, e as fundações. Discutindo os benefícios para a sustentabilidade (energia, materiais e resíduos), custos diretos e indiretos, e aspectos construtivos provenientes do reuso individual ou combinado destes componentes, eles propõem um “*fluxograma de avaliação da sustentabilidade*” para a sequencia de verificação estrutural requerida.

A vida útil prevista para o sistema estrutural, por sua vez, é um importante indicador da durabilidade da edificação como um todo. Seu cálculo demanda o uso de modelagem matemática dos mecanismos de deterioração. No caso das estruturas de concreto, modelos de previsão da vida útil mais usados, consideram, com amplo respaldo da literatura (DEBY et al., 2009; JUNG et al., 2013; NOGUEIRA; LEONEL, 2013), a deterioração por cloretos como mecanismo principal (EHLEN, 2012; SILVA et al., 2010).

Estudos das estruturas dos pavimentos-tipo de vinte e quatro edificações em concreto situadas no estado de São Paulo (BATLOUNI NETO, 2003) analisaram alguns indicadores dentre os quais, foram destacados: a área de influência do pilar, a espessura média de concreto, o volume de concreto dos pilares, e a área de fôrmas e formato dos elementos estruturais. Além disso, foram estabelecidas correlações entre estes indicadores, e deles com a altura da edificação e a resistência característica adotada ( $f_{ck}$ ). Estas correlações tiveram o objetivo de estimar, de forma expedita, a espessura média do concreto para o andar-tipo de determinado projeto e, com ela, o custo provável da estrutura. (BATLOUNI NETO, 2011)

O Quadro 2.4 lista os indicadores funcionais de sistemas estruturais encontrados na literatura, associados aos requisitos de desempenho correspondentes.

**Quadro 2.4 - Relação de indicadores funcionais encontrados na literatura e requisitos de desempenho correspondentes**

Requisitos de desempenho	Indicadores associados
Adaptabilidade ao uso	Relação entre vãos de lajes maciças e alveolares (m) e massa do pavimento por unidade de área ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) de edificações verticais [ $\text{m} / \text{kg}/\text{m}^2$ ]
	Capacidade de partição: (distribuição para fornecimento e descarte; conversão, transferência, medição e controle)
	Capacidade de adaptação: (ajustável, desconectável, acessível)
	Capacidade de extensão: (dimensão, localização e capacidade)
	Capacidade de multifuncionalidade: (integração de funções e universalidade)
Segurança estrutural	Relação entre peso próprio de vigas e sua capacidade de carga residual
Durabilidade	Vida útil de projeto
Minimização do consumo de recursos; economia	Área de influência do pilar ( $A_i$ ), relação entre a área do pavimento e o número de pilares [ $\text{m}^2$ ]
	Espessura média ( $e_m$ ), relação entre volume de concreto do pavimento e sua área estrutural [ $\text{m}^3/\text{m}^2$ ]
	Volume de concreto dos pilares [ $\text{m}^3$ ]
	Área de fôrmas e formato dos elementos estruturais relacionados com o volume de concreto correspondente [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

A preocupação com critérios de desempenho na construção é uma tendência mundial. Embora presente também no Brasil, sua aplicação às edificações nacionais ainda se encontra num estágio embrionário. Toda a normatização técnica brasileira vigente, referente à construção civil, é prescritiva, ou seja, tem a preocupação quanto à forma (meio) como o produto deve ser construído, e não com o desempenho esperado do produto ou sistema. Grande expectativa, portanto, recai sobre a ABNT NBR 15575:2013, intitulada “Edificações habitacionais – Desempenho”, publicada em 19/02/2013, que passou a vigorar a partir de 19/07/2013.

Os indicadores de desempenho selecionados neste trabalho devem contemplar os principais requisitos de desempenho atribuídos aos sistemas estruturais. Desta forma, procura-se abranger, com base nas normas ISO 6240:1980, ISO 6241:1984, ISO 9699:1994 e ABNT NBR 15575:2013 partes 1 e 2, os requisitos nos quais o sistema estrutural exerça papel preponderante no seu atendimento.

Com esta perspectiva, são considerados para o sistema estrutural os requisitos de segurança, adaptabilidade ao uso, economia, construtibilidade, durabilidade, manutenibilidade e adequação ambiental. Além dos indicadores de desempenho técnico-funcional aqui apresentados, são propostos indicadores adicionais a partir da experiência do autor como projetista estrutural, associados a requisitos de segurança estrutural, adaptabilidade ao uso, construtibilidade e durabilidade.

Os indicadores de desempenho encontrados na literatura correspondentes ao requisito de adequação ambiental são abordados no Capítulo 3 que trata de indicadores ambientais. E por fim, os indicadores referentes ao requisito economia encontrados na literatura, em especial, o custo do ciclo de vida (CCV) são discutidos no Capítulo 4.





## 3 INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL

### 3.1 INTRODUÇÃO

A normatização europeia define desempenho ambiental *como o desempenho relacionado a aspectos e impactos ambientais*. O primeiro refere-se a aspectos de obras, partes delas, processos ou serviços relacionados a seu ciclo de vida que podem causar alteração do meio ambiente. O último significa qualquer alteração do ambiente, adversa ou benéfica, total ou parcialmente resultante de aspectos ambientais (BS EN 15643-2: 2011).

A avaliação de desempenho ambiental das construções tem sido exaustivamente discutida no meio técnico mundial, com o objetivo de otimizar o processo de projeto, construção, reforma e demolição, avaliando a capacidade das edificações contribuírem para metas de sustentabilidade (ISO/CD 21931, 2002; ASIF et al., 2005; ORTIZ et al., 2009; ORTIZ et al., 2010; KHASREEN et al., 2009; NEMRY et al., 2010; CHEN et al., 2011; PONS; WADEL, 2011; CUELLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2012; FESANGHARY et al., 2012; HABERT et al., 2012; PONS; AGUADO, 2012; RAJAGOPALAN et al., 2012; ROSSI et al., 2012).

No Brasil, há cerca de dez anos, o desempenho ambiental de edificações já era uma necessidade percebida pela construção civil nacional e começava a se consolidar no país (SILVA, 2003). Entretanto, a Norma Brasileira de desempenho ABNT NBR 15575:2013, que estabelece os requisitos e critérios a serem atendidos pelas edificações, aborda o requisito de adequação ambiental de forma vaga, sem estabelecer critérios para atendimento. Por esta razão, este capítulo discute tendências e proposições internacionais para informar o desempenho ambiental de sistemas estruturais em concreto.

De acordo com Schmidt-Bleek (1993), o desafio fundamental da sustentabilidade consiste em diminuir o uso de recursos em termos absolutos, em lugar de somente reduzir os efeitos nocivos de substâncias específicas. Para viabilizar a redução do uso de recursos materiais e energéticos, é necessário um aumento da eficiência de recursos para prover de modo ambiental e socialmente sustentável os recursos naturais requeridos.

O conceito de eficiência de recursos, incluindo eficiência energética, objetiva minimizar resíduos, pela redução de entradas de matéria-prima, energia e água, reduzindo, ao mesmo tempo, custos de aquisição de materiais e de gerenciamento de resíduos (BLEISCHWITZ et al., 2009). Um aumento da eficiência de recursos proveniente de ecoinovações, por exemplo, pode levar à redução de custos de aquisição e ao aumento da competitividade. A medição do uso de recursos e de seus efeitos ambientais relacionados é um pré-requisito para monitoramento do progresso em direção à sustentabilidade (BURGER et al., 2009).

Na tendência mais recente detectada na literatura, as normas europeias EN 15643-2:2011, para avaliação ambiental das edificações, e EN 15804:2012, para regulamentação das declarações ambientais de produtos (EPDs), recomendam o uso de indicadores predeterminados com base em ACV, que possuam base científica acordada para a normatização europeia.

A EN 15643-2:2011 fornece as diretrizes para que o desempenho ambiental, no contexto da edificação ou de seus subsistemas, seja informado por meio de indicadores predeterminados, com base em ACV, e define três grupos de indicadores ambientais para descrever o desempenho ambiental no ciclo de vida da edificação ou partes dela, como o sistema estrutural. São eles: *indicadores de impactos ambientais* (associados a categorias de impacto das ACV); *indicadores de uso de recursos* (associados a aspectos ambientais); e indicadores para outras informações ambientais (associados a aspectos ambientais).

Para garantir transparência e um fluxo consistente de informações, a EN 15804:2012 recomenda que: (i) os indicadores devem ser quantificáveis, (ii) aqueles usados no nível do material/produto devem também ser aplicáveis à avaliação no nível da edificação, (iii) seus resultados individuais do nível do material/produto devem poder ser adicionados aos do nível da edificação, e por fim, (iv) devem evitar duplicidade de contagem.

Procurando atender a estas condições, vários indicadores ambientais encontrados na literatura foram discutidos e uma relação de indicadores de desempenho ambiental para os sistemas estruturais foi apresentada. Outros indicadores são citados na EN 15804:2012 como de uso corrente, com a ressalva, porém, de que eles ainda não possuem base científica acordada para que possam ser normatizados.

### 3.2 TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA COMO BASE PARA CÁLCULO DE INDICADORES AMBIENTAIS

A ACV consiste numa técnica de suporte à tomada de decisão na análise e avaliação holística dos impactos ambientais de um produto ou processo. É um processo iterativo com quatro estágios básicos que incluem: *definição de metas e escopo*, em que o propósito da análise e seus limites são especificados; *análise do inventário* ao longo do ciclo de vida (ICV), em que são realizados os cálculos das emissões produzidas e dos recursos utilizados; *avaliação dos impactos* do ciclo de vida (AICV), quando as emissões e o uso de recursos são relacionados a diversos problemas ambientais; e *interpretação* (BILEC et al., 2006). A ISO 14040: 2006 regulamenta os procedimentos e definições da ACV.

Por considerar os impactos do início ao fim de um ciclo de vida, a ACV permite uma visão holística e confiável dos aspectos ambientais associados ao cenário estudado, facilitando a comparação entre produtos e processos, ou, ainda, a contabilização dos impactos associados a um dado produto (SAADE et al., 2011). Isto torna a ACV uma valiosa ferramenta de gestão ambiental e suporte à decisão (CHEN et al., 2011). Finnveden e outros (2009) atribuíram a atratividade do uso de ACV ao foco nos produtos e processos em uma perspectiva de ciclo de vida, com um escopo eficiente na localização dos problemas, seja nas fases do ciclo de vida, nas diferentes regiões geográficas ou mesmo no tipo de impacto ambiental gerado.

As primeiras análises ambientais focavam áreas como materiais de construção, água, energia, uso do material em operação e manutenção, gerenciamento de resíduos de construção e demolição. As primeiras pesquisas sobre impactos ambientais de edificações frequentemente negligenciavam a fase do processo construtivo. Estudos de ACV evidenciaram que, ao se fazer isso, significativos impactos eram desprezados (BILEC et al., 2009). Lopez-Mesa e outros (2009) confirmaram a magnitude desses impactos ao compararem dois sistemas estruturais com tipos diferentes de lajes.

Uma ACV típica (ISO 14040:2006) fornece um resultado com diferentes valores de impactos, não incluindo métodos de ponderação. As categorias de impacto são avaliadas sem ênfase a alguma em particular. Modelos adicionais têm sido desenvolvidos para se obter um resultado único que possibilite a comparação entre produtos, embora a validade destes modelos seja sempre motivo de discussão, principalmente quanto ao método de ponderação (KHASREEN et al., 2009; AHLROTH et al., 2011). Vários destes sistemas de indicadores e de ponderação existentes,

incluindo a normalização de perfis ambientais, foram analisados no âmbito do projeto LoRe-LCA (*vide* Capítulo 0, item 1.2) (BUDAVARI et al., 2011).

Um estudo de caso realizado na Holanda (LUGT et al., 2006) exemplifica a aplicação de ACV associada a um método de ponderação para permitir que um resultado único possibilite a comparação entre produtos. Trata-se de uma avaliação técnica, econômica e ambiental do bambu como um material de construção para sistemas estruturais em construções temporárias europeias. Vigas, pilares e parapeitos fabricados em colmos de bambu, aço, madeira, e também concreto - no caso de pilares, foram analisados e comparados ambiental e economicamente. Resistência e rigidez foram os requisitos técnico-funcionais escolhidos como parâmetros de equivalência funcional. Os elementos estruturais em bambu apresentaram melhor desempenho ambiental, e, embora possam competir economicamente com as alternativas em madeira, os elementos em aço foram os mais econômicos.

Entre os inúmeros estudos de desempenho ambiental dos materiais de edificações com base em ACV (PEREZ-GARCIA et al., 2005; PUETTMANN; WILSON, 2005), além dos mencionados anteriormente, Haapio e Viitaniemi (2008) analisaram como a escolha do material e da solução estrutural podem afetar a avaliação ambiental de 78 edificações unifamiliares, com vida útil de projeto entre 60 e 160 anos. Outros pesquisadores investigaram ambientalmente edificações com vidas úteis que variavam entre 50 anos (THORMARK, 2006; JUNNILA et al., 2006; HAKKINEN et al., 2011) e 75 anos (SCHEUER et al., 2003; DOBBELSTEEN et al., 2005). A comparabilidade entre todos esses estudos, porém, é comprometida pelo fato de adotarem diferentes premissas metodológicas nas ACV.

Vale ressaltar os estudos de Ochsendorf e outros (2011) que exploraram e avançaram em três áreas relevantes da ACV de edificações: metodologia geral para ACV, definição de valores de referência e oportunidades de redução de impactos. O trabalho aborda os conceitos necessários à condução de uma ACV abrangente para as edificações, aplicada a uma gama de opções de projeto de edificações comerciais, residenciais multifamiliares e unifamiliares, usando tanto a ACV, quanto a ACCV para identificar as estratégias de maior custo-eficiência para redução das emissões. Tem por objetivo, encontrar valores de referência para as emissões de edificações em concreto e compará-las às de outros materiais de construção. Por fim, são identificadas e quantificadas oportunidades de redução das emissões utilizando modelos de ACV.



Questão de relevância nos estudos de ACV, os números absolutos são necessários para avaliar o desempenho ambiental e mostrar se houve acréscimo ou decréscimo do impacto ambiental total. Para usar os indicadores para comparação, os impactos devem ser normalizados, preferencialmente em relação a uma unidade funcional (UF). Para edificações, o impacto ambiental deve ser relacionado ao serviço produzido pela edificação (MALMQVIST; GLAUMANN, 2006).

*Unidade funcional* (UF) é definida pela ISO 14040:2006 como desempenho quantificado de um sistema de produção para uso como unidade de referência, enquanto o *equivalente funcional*, de acordo com a EN 15643-2:2011, adaptado da definição da ISO 21931-1:2010, é um conjunto de requisitos funcionais e/ou técnicos quantificados para a edificação ou partes dela, para uso como uma base justa de comparação.

A área construída bruta de edificações vem sendo frequentemente utilizada como base de comparação e os valores absolutos calculados de impactos ambientais, fluxos, custos, dentre outros, são divididos pela área de construção. Entretanto, outras medidas relacionadas aos serviços oferecidos pela edificação poderiam ser: volume da edificação; número de usuários estimado ou o número real de usuários da edificação (por exemplo, n° usuários/hora). O valor normalizado deveria ser escolhido de acordo com o propósito da comparação, que geralmente varia com o tipo de edificação (MALMQVIST; GLAUMANN, 2006).

No caso específico de sistemas estruturais, Purnell (2011) concluiu que parâmetros de projeto (dimensões, escolha da seção e capacidade de carga) para elementos estruturais básicos (vigas isostáticas e pilares) são, no mínimo, tão importantes quanto a escolha do material, na avaliação ambiental. Em seu estudo com foco em carbono incorporado, ele utilizou o CO<sub>2</sub> incorporado *por unidade de capacidade de carga por unidade de comprimento*. Sua pesquisa evidencia o cuidado a ser tomado na definição da unidade funcional, que deve exprimir a função do elemento estrutural para comparar desempenho de sistemas estruturais. Unidades funcionais adequadas às vigas e pilares seriam, respectivamente, *unidade de resistência à flexão por unidade de comprimento* [UF= kNm.m], e *unidade de capacidade de carga axial por unidade de comprimento* [UF=kN.m]. Ambas seriam função da capacidade de carga e dimensão relevante, tendo em vista que a relação entre o carbono incorporado de vigas e pilares e a massa (usualmente escolhida para unidade funcional) de materiais requerida para resistir ao carregamento é uma relação não-linear (PURNELL, 2011).

### 3.3 INDICADORES AMBIENTAIS DE CICLO DE VIDA

Processos de fabricação de materiais e produtos interagem com o meio ambiente de dois modos distintos. A terra é a fonte de todos os recursos materiais, e também, o depósito para emissões, efluentes e resíduos sólidos. O uso excessivo de recursos esgota a quantidade e qualidade dos recursos disponíveis, e sua extração degrada *in loco* os ecossistemas. Assim como o descarte excessivo devido a enorme geração de produtos e a disposição final descuidada de emissões e resíduos impactam o equilíbrio dos processos naturais e ecossistemas (CALKINS, 2009).

O Quadro 3.1 sintetiza os principais indicadores ambientais encontrados na literatura citada, para avaliar desempenho dos sistemas estruturais em concreto.

**Quadro 3.1 – Relação dos principais indicadores ambientais encontrados na literatura**

Indicadores de desempenho ambiental	
Associados a aspectos ambientais (intensidade do uso de recursos)	Pegada de água azul (bWF); Conteúdo de matéria-prima não renovável (NRc); Consumo de recursos materiais (Mc); Energia primária incorporada não renovável (EE <sub>ren</sub> ) em MJ; Energia primária incorporada renovável (EE <sub>ren</sub> ) em MJ.
Associados a impactos ambientais	Potencial de aquecimento global (GWP) que representa o carbono equivalente incorporado/embutido (ECO <sub>2e</sub> ) em kg CO <sub>2-eq</sub> ; Potencial de depleção da camada estratosférica de ozônio (ODP) em kg CFC11 <sub>-eq</sub> ; Potencial de acidificação da água e do solo (AP) em kg SO <sub>2-eq</sub> ; Potencial de eutrofização (EP) em kg (PO <sub>4</sub> ) <sub>3-eq</sub> ; Potencial formação de ozônio fotoquímico (POCP) em kg C <sub>2</sub> H <sub>4-eq</sub>

Como exemplo de indicadores comuns a vários setores industriais, cita-se o consumo de energia na produção dos materiais e as emissões de CO<sub>2</sub>, usualmente avaliadas como *energia incorporada* (EE) e *carbono incorporado/embutido* ou *pegada de carbono* (UN ST/ESCAP/2561, 2009). A literatura recente revela um interesse crescente em quantificar a energia e carbono equivalente incorporados na fase de construção das edificações (MONAHAN; POWELL, 2011; DIXIT et al., 2012). Esta tese está alinhada a esta tendência mundial de otimização de desempenho ambiental com o redirecionamento de ênfase em cargas e energia operacionais mantido nas últimas décadas, para focar as cargas embutidas em materiais, sistemas e processos construtivos (IEA ECBCS ANNEX 57, 2011).

### 3.3.1 Energia (primária) incorporada (EE)

A energia requerida durante todo o ciclo de vida de um material/produto, conhecida como energia incorporada (EE) se refere à energia primária total consumida na extração da matéria-prima, fabricação, transporte, construção, manutenção, demolição e disposição final de um material/produto de construção. A análise da energia incorporada pode focar diferentes parâmetros de estudo, sendo comumente realizada do berço ao túmulo ou do berço ao berço, podendo, no entanto, ser realizada para avaliar somente uma fase do processo de fabricação (CALKINS, 2009).

Materiais minimamente processados, geralmente possuem menor energia incorporada do que aqueles que requerem processamento maior ou mais complexo. Se um produto exige elevado consumo de energia em seu processamento primário (aço inoxidável e alumínio, por exemplo), então, é provável que a percentagem de teor reciclado seja maximizada para reduzir a energia requerida para sua produção. Se, no entanto, o produto é complexo (feito com mais de um material, por exemplo, um banco de aço e madeira), então, a energia incorporada irá incluir toda a energia exigida para processamento dos vários componentes, além da energia consumida no seu agrupamento/montagem.

Quantificar a energia total utilizada na fabricação de um produto é um desafio. Os valores obtidos são função de muitos fatores, tais como, o processo produtivo, a matriz energética do país ou região, os métodos de contabilização, limites do sistema considerados nas ACV, dentre outros. O Quadro 3.2 mostra a energia incorporada por diferentes unidades funcionais de alguns materiais empregados nos sistemas estruturais em concreto, quantificada por pesquisadores nacionais e internacionais.

A energia incorporada de materiais de construção tradicionais - tais como madeira, aço, vidro, concreto armado - e de materiais alternativos, como os de mudança de fase, tem sido um tema mundialmente pesquisado (ABANDA, 2013; VAN DEN HEEDE; BELIE, 2012). Resultados destes estudos recentes sobre a energia total consumida nas edificações evidenciam que (1) a avaliação da energia incorporada das edificações pode variar substancialmente, tanto devido à alta variabilidade nos dados dos materiais obtidos das ACV do berço ao portão, quanto à características regionais; e (2) a energia incorporada tem papel importante na energia total usada no ciclo de vida da edificação quando se trata de edificações passivas ou de energia zero (ROSSI et al., 2011).

**Quadro 3.2 - Energia incorporada por unidade de massa e/ou por unidade de área construída de alguns materiais utilizados em sistemas estruturais em concreto**

Materiais		EE total	(MJ/uf)	Fonte dos dados
Concreto fck 30MPa	CP I-S-32	256,68	MJ/m <sup>2</sup> área construída	SILVA; SILVA, 2013
	CP II-E-32	210,55		
	CP III-32	101,86		
Aço CA- 50		135,78		Obs: medianas dos valores obtidos para 4 estudos de caso de tipologia comercial e escolar com até 3 pavimentos em concreto armado.
Madeira compensada		86,25		
Concreto fck 30MPa		0,78 <sup>a</sup>	MJ/kg	HAMMOND; JONES, 2011
Concreto fck 30MPa com CEM I (~ CP I)		0,91		
Concreto fck 30MPa com 25% de substituição por escória granulada de alto forno		0,78		
Concreto fck 30MPa com 50% de substituição por de escória granulada de alto forno		0,65		
		17,4 <sup>b</sup>		
Aço para concreto armado (~ CA-50)		21,6 <sup>c</sup>		
		22,3 <sup>d</sup>		
Madeira compensada		15,0 <sup>e</sup>		<sup>a</sup> representativo de misturas típicas usadas no Reino Unido (UK). <sup>b</sup> típico do UK e Comunidade Europeia (EU) com 59% conteúdo reciclado. <sup>c</sup> média mundial p/ período de 3 anos tem 39% conteúdo reciclado. <sup>d</sup> média mundial (excluindo EU) p/ período de 3 anos tem 35,5% conteúdo reciclado. <sup>e</sup> inclui 7,1 MJ/kg de bioenergia

Estudos no âmbito do projeto LoRe-Lca (*vide* item 1.2 do Capítulo 0) mostraram que em edificações convencionais de países do norte e centro europeus, a energia incorporada dos materiais corresponde a 10-20%, enquanto 80-90% são atribuídos à energia consumida no estágio de uso, e menos de 1% é gasto no fim do ciclo de vida destas edificações. O amplo intervalo dos resultados se deve à variedade de edificações, materiais empregados, valores de vida útil, condições geográficas e climáticas (ZABALZA BRIBIAN et al., 2011). Por outro lado, cerca de 60 estudos com base em ACV indicaram que a proporção de energia incorporada nos materiais empregados em relação a toda a energia utilizada ao longo da vida útil de edificações localizadas na Europa, Canadá e Japão variou entre 9% e 46% para edificações projetadas para baixo consumo energético; e entre 2% e 38% para edificações convencionais. A vida útil considerada para a maioria dos casos foi de 50 anos, sendo de 30 anos para apenas um caso, e entre 75 e 100 anos para oito casos (ZABALZA BRIBIAN et al., 2011).

Para quantificar a energia primária incorporada das edificações, seus sistemas e materiais, o comitê técnico europeu CEN/TC 350 propõe nas normas EN 15643-2:2011, para avaliação ambiental das edificações, e EN 15804:2012, que regulamenta as declarações ambientais de produtos da construção (EPDs), dois indicadores de energia incorporada, distinguindo assim a energia primária incorporada renovável (EEren) e não renovável (EEn ren) dos materiais de construção.

### **3.3.2 Potencial de Aquecimento Global (EGWP) representado pelo carbono equivalente incorporado/embutido**

O ciclo global do carbono, constituído por grandes fluxos de carbono e reservatórios, envolve bilhões de toneladas em forma de dióxido de carbono. O CO<sub>2</sub> é absorvido pelos depósitos (oceanos e biomassa existente) e emitido para a atmosfera pelas fontes em processos naturais, tais como, decomposição de plantas ou matéria animal. Em equilíbrio, os fluxos de carbono são balanceados. No entanto, desde a Revolução Industrial até a década passada, as concentrações atmosféricas globais de CO<sub>2</sub> subiram cerca de 35%, devido, principalmente, à queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2001).

A queima de combustíveis fósseis em veículos, usinas de geração de energia, e como matéria-prima na produção de polímeros sintéticos, é responsável por 75% das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa. Outras significativas emissões de GEE resultam da conversão de calcário em cal para a fabricação de cimento, da agricultura animal e do desmatamento (IPCC, 2007).

Frequentemente, as emissões de GEE estão diretamente associadas à energia incorporada no material de construção, uma vez que, para a maioria dos materiais, as emissões resultam da queima de combustíveis fósseis necessária à sua produção. Por exemplo, a produção de aço necessita de uma quantidade relativamente grande de energia, derivada primariamente dos processos de queima de carvão (CALKINS, 2009).

Alumínio e concreto são, no entanto, duas importantes exceções entre os materiais de construção, por diferentes razões. Segundo Calkins (2009), como a energia exigida para fabricação do alumínio é muito grande, a energia hidroelétrica é a principal fonte utilizada (55%). Enquanto a energia hidroelétrica impõe outras questões ambientais, sua emissão de CO<sub>2</sub> é relativamente baixa comparada à queima de carvão, ou mesmo, gás natural. Portanto, para a mesma massa de

material, o aço tem uma menor energia incorporada que o alumínio, porém maior emissão de GEE. As emissões de GEE do concreto são cerca de 2 vezes a sua energia incorporada, já que quase a mesma quantidade de CO<sub>2</sub> liberada na conversão de calcário em cal é liberada na queima de combustível fóssil para funcionamento do forno.

Como um indicador ambiental, o potencial de aquecimento global (EGWP) dado pela quantidade de CO<sub>2-eq</sub> incorporado é um dos mais utilizados na avaliação e comparação entre sistemas estruturais de diferentes materiais. Esta mesma análise pode ser feita para os demais sistemas construtivos. Dada a complexidade de se processar uma ACV mais completa, tende-se a definir o perfil ambiental de uma estrutura, simplificada, por meio da consideração das emissões de CO<sub>2-eq</sub> no ciclo de vida do sistema estrutural (NIELSEN, 2008).

Com base em sistemas de quantificação da emissão de carbono no ciclo de vida das edificações, Chen e outros (2011) propuseram um conjunto de indicadores para avaliar o comportamento das edificações quanto a emissões de CO<sub>2</sub>. Indicadores de intensidade foram utilizados para avaliar a quantidade de emissões de carbono incorporadas por unidades de área, vida útil, e *per capita*.

No cômputo do consumo total de CO<sub>2-eq</sub> (incorporado e operacional) a matriz energética do país possui forte influência sobre o consumo de CO<sub>2-eq</sub> operacional, podendo inverter completamente os resultados da pegada de carbono da edificação no ciclo de vida. Uma edificação modulada, situada em Portugal e na Suécia foi analisada por Rossi e outros (2012) com a técnica de ACV. Os resultados mostraram que, em Coimbra, o carbono operacional (emissões de CO<sub>2-eq</sub> na fase de uso) foi muito maior que o CO<sub>2-eq</sub> incorporado (da fase de produção), enquanto que em Luleå (Suécia), as emissões de CO<sub>2-eq</sub> na fase de produção foram muito maiores que na fase de uso, apesar da energia consumida ter sido maior na Suécia. Isto se deve ao modo como a eletricidade e aquecimento são gerados.

O fato do consumo de energia e emissões durante a produção de edificações ser diferente entre países, não se relaciona à construção ou ao projeto da edificação em si, mas à estrutura do consumo de energia e a variações na eficiência energética para a fabricação de materiais em cada um. No caso do Brasil, devido à alta parcela de renováveis na sua matriz elétrica (89%), a intensidade de carbono na produção de eletricidade, em 2011 (56 kgCO<sub>2</sub>/MWh), foi muito mais baixa que a média mundial (EPE, 2012). Essa redução das emissões operacionais, pode elevar a parcela relativa aos materiais no total do ciclo de vida. A eficiência e o mix energético da cadeia

de materiais e das atividades de construção definem a magnitude deste aumento (SILVA; SILVA, 2013).

Segundo Hakkinen e Vares (2011), existe o entendimento de que, nos países nórdicos, os materiais de construção respondem por 5-15% do consumo de energia e das emissões. No entanto, seu estudo com base em ACV e indicadores de sustentabilidade, para o projeto de uma creche finlandesa com vida útil de 50 anos, mostrou que a escolha dos materiais pode ser a causa de quase metade das emissões de CO<sub>2</sub>-eq do edifício no ciclo de vida. A energia incorporada em construções novas e *retrofit* é responsável, anualmente, por cerca de 10% da energia total consumida no Reino Unido (GOGGINS et al., 2010). Resultados de Sturgis e Roberts (2010) mostram que o percentual de carbono equivalente incorporado (comparado ao carbono operacional) em edificações residenciais, comerciais, armazéns e supermercados é de 30%, 45%, 60% e 25%, respectivamente (ABANDA et al., 2013).

Inúmeros relatórios sobre impactos ambientais de empreendimentos são encontrados na literatura, com metodologias e procedimentos para a quantificação de emissões, com base, principalmente, em análise de *input-output* (IO) e em modelos com base em processo (por exemplo, utilizando ACV). Alguns estudos tecem comparações (DIXIT et al., 2010; CHANG et al., 2010), enquanto outros propõem modelos híbridos com base nestas duas abordagens (TRELOAR et al., 1997; MINX et al., 2007; SUH; LIPPIATT, 2012). Com foco nos modelos matemáticos fundamentais para as análises IO e com base em processo, Abanda e outros (2013) propuseram um *framework* para desenvolvimento de um modelo integrado que pode ser usado nas fases preliminares de projeto, para previsão de energia e CO<sub>2</sub>-eq incorporados, resíduos, tempo e custos de construção.

### 3.3.3 Indicadores de ciclo de vida em declarações ambientais de produtos

As chamadas Declarações ambientais de produto (EPDs), realizadas de acordo com as diretrizes da ISO 14025, fornecem informação confiável, imparcial e transparente, demonstrando a responsabilidade dos fabricantes quanto à sustentabilidade ambiental de seus produtos. As informações contidas nas EPDs também são usadas pela nova geração de sistemas de avaliação e certificação de edificações orientados a desempenho (BRAUNE et al., 2013; FOLVIK; WAERP, 2009).

Sistemas de EPD, tais como o alemão IBU<sup>33</sup>, o francês ou o sueco oferecem uma verificação

---

<sup>33</sup> Institute Construction and Environment

externa por entidades independentes<sup>34</sup>. Os indicadores com base em ACV comunicados pelas EPDs, de acordo com o alemão IBU, e posteriormente incorporados à EN 15804:2012 são:

- potencial de aquecimento global (GWP) em kg CO<sub>2-eq</sub>;
- potencial de depleção da camada de ozônio (ODP) em kg CFC<sub>11-eq</sub>;
- potencial de acidificação da água e do solo (AP) em kg SO<sub>2-eq</sub>;
- potencial de eutrofização (EP) em kg (PO<sub>4</sub>)<sub>3-eq</sub>;
- potencial formação de ozônio fotoquímico (POCP) em kg Etileno<sub>-eq</sub>;
- entrada de energia primária não renovável (EEn ren) em MJ;
- entrada de energia primária renovável (EEren) em MJ.

Muller e outros (2013) utilizaram os indicadores AP, EP, ODP, POCP, GWP e EE<sub>nren</sub> para comparar estruturas de concreto de altíssimo-desempenho e de concreto de resistência e desempenho normais, em seus estudos que lidam com o conceito de desempenho aplicado ao projeto de estruturas orientado à durabilidade. Eles analisaram o uso mais eficiente do concreto, considerando sua resistência e durabilidade ao longo da vida útil das estruturas. Com exemplos de estruturas projetadas para 50 anos de vida útil nesses materiais e considerando seu consumo na produção, construção e manutenção ao longo deste período, eles confirmaram o melhor desempenho ambiental da estrutura em concreto de altíssimo-desempenho, considerando que a engenharia estrutural sustentável se apoia no princípio básico de que o consumo de energia e recursos provenientes da construção e operação das estruturas seja minimizado.

Infelizmente, no Brasil, as EPDs são ainda inexistentes. Mesmo internacionalmente, as EPDs ainda não se encontram suficientemente disseminadas ao ponto de se posicionarem entre as fontes preferidas de informação ambiental para planejadores de construção (BRAUNE et al., 2013). Embora o conceito de ciclo de vida seja fundamental para a melhoria dos sistemas de certificação dos produtos, de modo geral, os dados e ferramentas de ACV precisam melhorar para apoiar e capacitar as tendências do mercado (RAJAGOPALAN et al., 2012).

O conjunto de indicadores listado acima pode ser complementado por outros, tais como potencial de depleção abiótica para recursos fósseis e não fósseis (ADP); indicadores de resíduos e pegada de água, dentre outros (BRAUNE et al., 2011; EN 15804:2012). Indicadores considerados relevantes para sistemas estruturais e seus materiais constituintes que, apesar de previstos no

---

<sup>34</sup> Verificação externa por uma terceira parte é opcional para comunicação entre empresas e obrigatória para comunicação entre empresa e consumidor, de acordo com a EN ISO14025:2010.



corpo geral da norma específica EN 15804:2012, tipicamente não fazem parte do conteúdo mínimo de EPDs, são apresentados e brevemente discutidos nos próximos itens.

### **3.3.4 Pegada de água azul (bWF)**

Atividades humanas e usos do solo podem esgotar reservas de água, seja devido a um consumo superior ao da produção dos aquíferos ou por práticas que comprometam a recarga do mesmo. Atividades da indústria utilizam água e liberam resíduos efluentes nos corpos d'água, poluindo-os, e desta forma também comprometem as reservas de água.

Além disto, o uso de superfícies impermeabilizadas, como concreto e asfalto, reduz seriamente a recarga de água subterrânea, assim como as estratégias de coleta de água de chuva canalizada para fora dos canteiros. O esgotamento dos mananciais de água traz sérias consequências, como interrupção dos ciclos hidrológicos, redução da água disponível para diluição de poluentes e decréscimo de água para consumo humano e para comunidades da flora e fauna que requerem suprimento de água mais constante e abundante (CALKINS, 2009).

De um conjunto de indicadores ambientais-chave propostos pela OECD (2008), cita-se a qualidade da água, dentro do tema poluição, tendo como indicador disponível, *taxas de conexão de tratamento de águas residuárias*. Outro indicador seria *carga poluidora para corpos de água*, porém este último ainda requer mais especificação e desenvolvimento, com expectativa de obtenção em médio prazo. Dentro do tema bens e recursos naturais, têm-se os recursos de água e o indicador correspondente seria *intensidade de uso da água* como recurso natural, cujos dados são disponíveis para a maioria dos países membros da OECD.

A metodologia publicada por Hoekstra e outros (2011) para avaliação da Pegada de Água contempla três componentes principais, quais sejam: pegada de água azul (água superficial e subterrânea utilizada), pegada de água verde (água pluvial utilizada), e pegada de água cinza (água doce poluída). Apesar de seu uso ainda incipiente, o método de avaliação parece ser detalhado o suficiente para fornecer futuramente uma base razoável para uso na indústria da construção.

### **3.3.5 Conteúdo de matéria-prima não renovável (NRc)**

O consumo de materiais de construção é comumente descrito em termos de seu conteúdo reciclado, reciclável, regional ou renovável. No entanto, esses atributos contemplam apenas parte da questão. Muito mais relevante, embora bem menos comum na literatura, o conteúdo não

renovável comunica a intensidade de depleção de matéria-prima não renovável (SAADE et al., 2012).

### **3.3.6 Consumo de materiais (Mc)**

O consumo de materiais empregados nos sistemas estruturais é um indicador consagrado na prática de projeto estrutural e está contemplado na EN15643-2:2011 como indicador de uso de recursos (aspecto ambiental), embora não seja um indicador ambiental de ciclo de vida, e portanto, não é calculado com base em ACV. Sua presença no conjunto de indicadores ambientais a ser proposto nesta tese objetiva facilitar a introdução dos demais indicadores ambientais, ainda desconhecidos no âmbito dos projetistas de estruturas, tomadores de decisão quanto à escolha da concepção estrutural da edificação. Além disso, ele contabiliza, também, o uso de matéria-prima renovável, como a madeira compensada, frequentemente utilizada como fôrmas das estruturas em concreto moldadas *in loco*. Os dados coletados para seu cálculo, são expeditos e compõem também os fluxos de referência para cálculo dos demais indicadores ambientais.

## **3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO**

A norma ABNT NBR 15575: 2013, em seu estado atual, não provê suporte à especificação de indicadores de desempenho ambiental, mas apenas recomenda que os empreendimentos sejam projetados, construídos e mantidos minimizando as alterações no ambiente. Estas questões foram contornadas nesta pesquisa, com a busca por orientação na literatura e com base na metodologia proposta para desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para edificações da ISO/TS 21929-1: 2006; ISO 15392:2008 e ISO 21931-1: 2010.

A definição dos tipos de indicadores a serem considerados para avaliar o desempenho ambiental dos sistemas estruturais em concreto seguiu as diretrizes da EN 15643-2:2011. Nela, o desempenho ambiental é definido como o desempenho relacionado a *aspectos ambientais* e a *impactos* deles resultantes.

A EN 15804:2012 regulamenta as declarações ambientais de produtos (EPDs) e fornece as diretrizes para que o desempenho ambiental da edificação ou de seus subsistemas seja informado por meio de indicadores predeterminados, com base em ACV, e divididos em dois grupos: *indicadores de impactos* ambientais (associados a categorias de impacto das ACV); e *indicadores*

*de uso de recursos* (associados a aspectos ambientais); e para outras informações ambientais (associados a aspectos ambientais).

Portanto, vários indicadores ambientais encontrados na literatura foram abordados, e uma relação de indicadores de desempenho ambiental para os sistemas estruturais apresentada, de acordo com as normas EN 15643-2:2011 e EN 15804:2012.

Desta forma, espera-se avaliar de modo sistematizado e cientificamente reconhecido, o desempenho ambiental dos sistemas estruturais das tipologias estudadas e obter valores - hoje praticamente inexistentes - para os indicadores compreendidos em EPDs no país.

O próximo capítulo trata do custo do ciclo de vida, e seu emprego como indicador econômico de sistemas estruturais em concreto.





## 4 CUSTO DO CICLO DE VIDA COMO INDICADOR ECONÔMICO

### 4.1 INTRODUÇÃO

O sistema estrutural é o de maior valor econômico entre todos os sistemas construtivos da edificação (BATLOUNI, 2011). Além disso, a sua escolha possui grande influência no valor que o cliente atribui à edificação, por determinar o grau de funcionalidade e de flexibilidade futura da edificação e da velocidade de sua execução com um enorme impacto no desempenho da edificação completa, seja no curto ou longo prazo (SOETANTO et al., 2006; HAROGLU et al., 2009). Sua escolha depende da tipologia da edificação e de restrições específicas de sítio, além de um grande número de questões comumente consideradas pelos agentes envolvidos nos projetos, como *custo* e tempo de construção (IDRUS; NEWMAN, 2002; 2003; HAROGLU, 2009).

O custo inicial de projeto e construção (custo de capital) é um dos mais utilizados critérios de seleção não só do sistema estrutural, mas de todos os sistemas construtivos das edificações. Estudos em países em desenvolvimento evidenciaram a pouca importância dada aos custos operacionais e de manutenção dos sistemas estruturais. Mesmo na construção industrializada de edificações, ou seja, na pré-fabricação, o custo de mão-de-obra e o tempo de construção foram classificados entre os fatores mais críticos de sustentabilidade nos sistemas industrializados característicos de países em desenvolvimento (YUNUS; YANG, 2012).

Hong e outros (2012) argumentaram sobre a conveniência em considerar simultaneamente os impactos econômicos e ambientais ao avaliar alternativas de projeto estrutural durante o processo de projeto, e apoiar a tomada de decisão quanto à solução mais sustentável, a partir das reduções do custo do ciclo de vida e do potencial de aquecimento global, medidas em relação a uma alternativa original. No entanto, os autores, propuseram um modelo que considera somente a fase de pré-uso do ciclo de vida da edificação (produção dos materiais, transporte e construção), avaliando os custos para a construção e CO<sub>2</sub> emitidos de alternativas de sistema estrutural da edificação em concreto usinado com diferentes resistências.

Portanto, a consideração do custo do ciclo de vida da edificação, ou seja, a perspectiva de longo prazo é um grande desafio a ser vencido para que a engenharia nacional e de demais países em

desenvolvimento se alinhem à tendência mundial na busca da sustentabilidade do ambiente construído.

Dentre os indicadores econômicos com maior frequência de incidência na literatura encontram-se o custo do ciclo de vida (CCV), o retorno do investimento (*Payback period*, denominado simplifiadamente de *payback*), e o apoio à economia local (ANDRADE; BRAGANÇA, 2011; HARTKOPF et al., 2009; JEONG; LEE, 2009; KONIG; CRISTOFARO, 2012; LIPPIAT; HELGESON, 2009; LUETZKERDORF et al., 2011; SANTOS; TENÓRIO, 2010).

O *apoio à economia local* é tratado em vários sistemas de avaliação ambiental de edificações como a quantidade de materiais extraídos ou produzidos num raio de até 800km, e calculado pela percentagem do custo total de materiais empregados na estrutura, correspondente aos materiais de origem local (HARTKOPF et al., 2009; ANDRADE; BRAGANÇA, 2011).

O *payback simples* usa valores reais (sem desconto) para as verbas futuras, enquanto o *payback descontado* utiliza valores presentes. Ambos utilizam a relação de retorno - relação entre o custo de capital e o benefício anual gerado ( $\text{custo}(\$/\text{economia}(\$/\text{ano}))$ ) para uma alternativa única de projeto. Por esta razão, não são úteis para a classificação de múltiplas alternativas, com variações de perfis de custo e variações no capital (BARRINGER, 2003).

Comparando-se os indicadores CCV e *payback* simples, observa-se que o último ignora todos os custos e economias que ocorrem após o período de retorno ter sido alcançado (ISO 15686-5:2008), enquanto que o CCV inclui considerações de dois fatores adicionais: a vida útil da unidade em estudo e a taxa de desconto para o consumidor/usuário/empreendedor (SANTOS 2007; BUYS et al., 2011).

Reconhecendo o CCV como um indicador adequado para avaliar o desempenho econômico de alternativas de projeto de edificações, assim como o consenso da comunidade científica quanto ao uso de indicadores com base em ACV para sua avaliação ambiental, o NIST<sup>35</sup> desenvolveu uma ferramenta que relaciona o desempenho ambiental ao desempenho econômico de alternativas de projeto, com base em ACV e ACCV, chamada BEES<sup>36</sup>. Uma abordagem híbrida aproveita a especificidade da abordagem de ACV com base em processo, e o quadro completo de dados quantificados da abordagem de *input-output* (IO) para comparar sistemática- e

---

<sup>35</sup> National Institute of Standards and Technology, USA.

<sup>36</sup> Building for Environmental and Economic Sustainability.

cientificamente o desempenho ambiental no ciclo de vida, na escala da edificação (LIPPIATT, HEGELSON, 2009; SUH, LIPPIATT, 2012).

O CCV obtido com a metodologia de avaliação de custo do ciclo de vida normatizada pela ASTM (ASTM, 2005a), é combinado aos resultados de desempenho ambiental obtidos com a referida ACV híbrida, possibilitando que métricas de ecoeficiência sejam desenvolvidas com base em comparações entre alternativas de projetos que incluem soluções tradicionais e soluções mais sustentáveis (LIPPIATT, HEGELSON, 2009).

Li e Guo (2012), por sua vez, utilizaram a ACCV para buscar valores de referência para custos de manutenção e desenvolver um modelo de previsão de custos de manutenção, a partir de dados históricos de cerca de 8400 eventos de manutenção ao longo de mais de 40 anos, referentes a 4 edificações da Universidade Nacional de Taiwan.

## 4.2 O CUSTO NO CONTEXTO DA SUSTENTABILIDADE

Sustentabilidade é um conceito de longo prazo, porém com viabilidade atualmente medida numa contrastante visão de curto prazo, com base em variações da análise de custo inicial. Várias estratégias/tecnologias que, de fato, têm custo inicial maior pagam-se ao longo de um horizonte de tempo que ainda pode ser bastante razoável, apesar de acima do usualmente aceito e praticado na construção civil (MELAVER; PHYLLIS, 2009; SILVA; PARDINI, 2010).

Edificações são tipicamente investimentos de longo prazo, de magnitude significativa, e os modelos de valoração existentes tendem a contabilizar os custos e benefícios da fase de aquisição do produto (NORNES, 2005). Enxergar uma edificação ou um empreendimento de maneira não convencional, por meio do conceito de seu ciclo de vida, cujo ponto de partida antecede a elaboração dos projetos e o término se estende além do término das obras, é um dos primeiros passos na busca da sustentabilidade e, segundo Silva e Pardini (2010), pode ser considerado quebra de paradigma.

É possível haver compatibilidade entre a eficiência do uso de recursos e minimização de custos, ou seja, decisões de projeto podem ser ajustadas para contribuir para redução do impacto ambiental da construção sem perda de valor monetário (BORCHERS, 2010). Dentro desta perspectiva, alguns aspectos econômicos relativos ao requisito de *manutenibilidade* da ABNT NBR 15575:2013, devem ser considerados.

Hoje, é importante considerar também os custos do fim da vida útil, priorizando alternativas com potencial para reuso e reciclagem, minimizando a disposição final em aterros (ZABALZA et al., 2011). Além disso, soluções que buscam viabilizar a construção com o menor custo possível, na maioria das vezes, podem comprometer aspectos relevantes da habitação, como estética, condições de conforto ambiental, dentre outros.

Para isso, o projeto construtivo deve ser pensado para atender às exigências dos usuários, e ao mesmo tempo, dimensionado para otimizar os recursos materiais e minimizar perdas durante o processo construtivo, a fim de diminuir os custos, tempo de construção e custos de operação (KRONKA, 2001). Também devem ser tomadas medidas de projeto que simplifiquem a sua geometria e, conseqüentemente, sua execução (SPENCE; MULLIGAN, 1995; KRONKA, 2001; BATLOUNI NETO, 2011).

De fato, no caso das estruturas de concreto, o seu custo é influenciado por um número grande de variáveis, dificultando o estabelecimento de indicadores simples e confiáveis para defini-lo. Estas variáveis podem ser classificadas em grupos, tais como os indicados no Quadro 4.1:

**Quadro 4.1 - Grupos de variáveis que influenciam o custo das estruturas de concreto (BATLOUNI NETO, 2011)**

Principais grupos de variáveis que influenciam o custo das estruturas de concreto
(a) geometria
(b) demais características de projeto (sobrecargas de serviço e permanente, tipo de vedação e materiais de acabamento, tipo de fachada)
(c) método construtivo
(d) local de execução da obra (condições de exposição como ventos e agressividade atmosférica)
(e) preços dos insumos e serviços (a concepção pode ser direcionada a reduzir o volume de concreto, ou a taxa de armadura, ou a mão-de-obra empregada; a decisão é tomada com base na engenharia de valor)
(f) soluções adotadas no projeto da estrutura (concepção, fck, formato dos elementos estruturais, racionalização, exequibilidade, detalhamento – inclusive a qualidade da apresentação)

A partir da década de 90, houve maior conscientização sobre a necessidade de melhorar a produtividade e qualidade das obras, quer por racionalização do processo e do projeto, quer pela diminuição de atividades exercidas na obra, aliada à otimização dos projetos (BATLOUNI NETO, 2002).

Procurar aumentar a produtividade no canteiro de obras e conseqüentemente, reduzir custos de produção e de mão-de-obra é, na verdade, uma forma de manter a competitividade das empresas de construção (BATLOUNI NETO, 2011). Embora seja essencial para a evolução da engenharia



civil, e da construção de edificações, isto não é suficiente para garantir o desempenho, a qualidade e a otimização dos custos do seu produto final ao longo do ciclo de vida. O custo do ciclo de vida (CCV) da edificação e suas partes, como o sistema estrutural, embora não tão expedito, é o único que contempla todos estes aspectos e, por esta razão, será o indicador econômico utilizado neste trabalho.

As edificações mais sustentáveis, além de contribuírem para o meio ambiente e potencialmente poderem apresentar custos operacionais e de manutenção inferiores às edificações tradicionais (LANGDON, 2007; KATS, 2003; KATS, 2006), desempenham papéis sociais junto à comunidade, seja por seu aspecto cultural ou de saúde (HANDLER, 1970; HAKKINEN, 2012), e junto às regiões nas quais estão inseridas, como agente promotor da valorização da área e da geração de empregos diretos e indiretos. No entanto, existe uma grande lacuna – de entendimento e conhecimento – entre a indústria sustentável e as entidades (pessoas ou organizações) responsáveis pela viabilidade de um empreendimento (DAVIES, 2005; SILVA; PARDINI, 2010).

### **4.3 AVALIAÇÃO DO CUSTO DO CICLO DE VIDA**

Originalmente concebida para fins de aquisição no Departamento de Defesa dos EUA, a ACCV ainda é usada no setor do serviço militar, bem como na indústria de construção (COLE; STERNER, 2000; KORPI; ALA-RISKU, 2008).

A avaliação de desempenho econômico de edificações é bem mais direta que a de desempenho ambiental. Dados publicados de desempenho econômico são prontamente disponíveis, e há métodos normatizados e bem estabelecidos para conduzir suas avaliações. Dentre eles, o mais apropriado para medir o desempenho econômico de edificações é a avaliação de Custos do Ciclo de Vida (ACCV), padronizada pela ASTM E 917-05: 2005a, para análise de investimentos de edificações (LIPPIATT; HELGESON, 2009).

A Comissão Europeia também desenvolveu uma estrutura metodológica para condução da ACCV, largamente difundida na União Europeia, para suas edificações e todo o patrimônio construído como uma contribuição para a construção sustentável (LANGDON, 2007; 2007a). A técnica estima o custo de edificações inteiras, sistemas e/ou componentes e materiais de construção (ISO 15686-5:2008), e pode auxiliar a tomada de decisão quanto a projetos de

investimento na construção, ou monitorar os custos incorridos durante todo o ciclo de vida, incluindo a aquisição, construção, operação, gestão, reparos e disposição final.

A ISO 15686-5:2008, por sua vez, dá as diretrizes para a realização da ACCV da edificação ou partes dela, para previsão e avaliação do seu desempenho econômico. Ela define o custo do ciclo de vida (CCV) como o custo de um ativo ou de suas partes, durante todo o seu ciclo de vida, enquanto ele cumprir seus requisitos de desempenho. E define a ACCV como a metodologia para a avaliação econômica sistemática dos custos do ciclo de vida ao longo de um período de análise, conforme definido no escopo acordado.

O desempenho econômico é avaliado sobre um determinado período de tempo, conhecido como período de estudo ou de referência, que começa com o projeto da edificação e termina num certo ponto no futuro. Para o investidor privado este período coincide com o seu período de propriedade. Para a sociedade como um todo, o período de estudo de 25 anos é frequentemente considerado. Apesar das edificações terem vida útil bem mais longa que isto, este período de estudo mais curto é escolhido devido à obsolescência tecnológica; ao fato de que uma data futura aumenta muito a incerteza; e de que quanto mais longe no futuro, menos importantes ficam os custos (LIPPIATT; HELGESON, 2009).

A técnica de ACCV soma no período de referência, todos os custos relevantes associados à edificação. Soluções alternativas para a mesma edificação podem, então, ser comparadas a partir de seus custos do ciclo de vida (CCV), determinando-se qual a de menor custo para satisfazer a função da edificação naquele período. Tipicamente, as categorias de custo incluem custos de aquisição; instalação; operação; manutenção; reparos; e substituições (LIPPIATT; HELGESON, 2009).

O objetivo do CCV é oferecer ao engenheiro, empresário e homem público uma ferramenta gerencial para seleção de materiais ou produtos, que contabilize os custos totais do sistema em análise, desde a sua concepção até o fim de sua vida útil (SANTOS; TENORIO, 2010). O somatório de todos esses custos permitirá selecionar a alternativa mais adequada econômica e financeiramente. Como o ciclo de vida dos sistemas estruturais de edificações representa um período mínimo de 50 anos (ABNT NBR 15575:2013), todos os custos incorridos nesse período precisam ser tratados dentro do conceito (SANTOS; TENORIO, 2010) do custo do dinheiro no tempo.

Para o cálculo do CCV, é necessário identificar todos os custos de um projeto ao longo de sua vida útil e calcular o Valor Presente Líquido (VPL) de cada um, ou seja, trazer os custos previstos no tempo para o presente. A Equação 4.1 apresenta uma fórmula genérica de CCV, originalmente proposta por Marshall e Petersen (1995) e adaptada por Pardini (2009):

$$CCV_{(VP)} = I_{(VP)} + E_{(VP)} + OM\&R_{(VP)} - S_{(VP)} + DF_{(VP)} \quad \text{Equação 4.1}$$

*onde:*

$$CCV_{(VP)} = CCV_{total} \text{ em valor presente (VP)}$$

$I_{(VP)}$  = Investimento inicial (soma dos custos investidos, trazidos a valor presente);

$E_{(VP)}$  = soma dos custos provisionados para energia ao longo do período de vida estabelecido  $t$ , trazidos a valor presente;

$OM\&R_{(VP)}$  = soma dos custos provisionados para operação, manutenção e reformas ao longo do período de vida estabelecido  $t$ , trazidos a valor presente;

$S_{(VP)}$  = soma dos benefícios provisionados como resultado da operação da alternativa estudada em forma de valor residual;

$DF_{(VP)}$  = soma dos custos provisionados para a disposição final do empreendimento.

Após o somatório de cada subsistema/elemento estrutural do projeto, o resultado final será o custo do ciclo de vida total do projeto estrutural. Repete-se o mesmo procedimento para as demais alternativas do projeto. A alternativa com o menor valor para CCV será a indicada como a melhor opção financeira.

Gardner e outros (2007) realizaram a ACCV de um sistema estrutural de edificação comercial com 4 pavimentos e 50 anos de vida útil de projeto, para três tipos de materiais metálicos: aço carbono, aço inoxidável e liga de alumínio, e mostraram por meio de resultados normalizados em relação a uma das alternativas, que a seleção de materiais estruturais tradicionalmente embasada no custo inicial pode induzir à escolha de alternativa estrutural mais cara, sob a perspectiva de ciclo de vida. Segundo os autores, as taxas de desconto comumente utilizadas nas ACCV, para o cálculo do valor presente, variam de 1% a 8%. Em seu estudo, utilizaram 3,5% (taxa de desconto proposta pelo governo britânico para avaliar custos em todas as iniciativas de finanças públicas). A Equação 4.2 foi utilizada para cálculo do CCV.

$$LCC = I + A + \sum_0^{t_n} \left[ \frac{M}{(1+r)^{t_i}} \right] + \left[ \frac{E}{(1+r)^{t_n}} \right] + \left[ \frac{R}{(1+r)^{t_n}} \right] \quad \text{Equação 4.2}$$

onde,

*I* é o custo inicial dos materiais incluindo: matéria-prima, produção das ligas metálicas, fabricação das peças;

*A* são custos iniciais adicionais, tais como proteção contra incêndio e proteção contra corrosão;

*M* é manutenção e inspeção incluindo custos de materiais de reparos para proteção contra incêndio e corrosão; e interrupção do uso da estrutura;

*E* são custos de fim de vida, incluindo demolição e desmontagem;

*R* é o valor residual dos materiais incluindo reciclagem;

*r* é a taxa de desconto: %

*t<sub>i</sub>* é o tempo de intervenção, em anos

*t<sub>n</sub>* é a vida útil de projeto, em anos

Há muitos softwares disponíveis para o cálculo do CCV. O *Life-365 v.2.1.1* (EHLEN, 2012), por exemplo, é um software muito utilizado, desenvolvido com base em uma estrutura geralmente aceita para estimativas de custo do ciclo de vida, e com base em um modelo de previsão de vida útil de estruturas de concreto expostas ao ataque de cloretos. Quatro parâmetros econômicos devem ser definidos para o cálculo do CCV no *Life-365 v.2.1.1*: o período de referência, o ano de referência, a taxa de inflação anual e a taxa real de desconto. Para o cálculo do valor presente dos custos de manutenção e reparos previstos ao longo da vida útil do sistema estrutural, a Equação 4.3 é utilizada:

$$VP = c \cdot \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \quad \text{Equação 4.3}$$

onde,

*i* é a taxa de inflação anual;

*r* é a taxa real de desconto anual;

*c* é o custo futuro no ano *t*.

Segundo Korpi e Ala-Risku (2008), os custos de um determinado produto foram classificados por Fabrycky e Blanchard (1991) em quatro categorias, quais sejam, pesquisa e desenvolvimento, produção e construção, operação e manutenção, e fim de vida útil e disposição final.

Santos (2007) descreveu a metodologia de ACCV em quatro etapas: (i) Definição da unidade a ser estudada; (ii) Estimativa do ciclo de vida; (iii) Elaboração do inventário para cada material que compõe as alternativas a serem analisadas; e (iv) Atualização financeira e composição dos custos totais. Portanto, a metodologia da ACCV tem como instrumento, o indicador Custo do Ciclo de Vida (CCV), que é a somatória do custo de aquisição (custo inicial de construção) ( $I$ ), custos operacionais anuais (ou a cada período de  $x$  anos) ( $OM\&R$ ) descontados no tempo de vida útil ( $t$ , em anos), custos para disposição final ( $DF$ ), descontadas as receitas ( $S$ ) provenientes de venda para reuso ou reciclagem do elemento em estudo.

O Quadro 4.2 mostra as variáveis de custo que compõem o indicador econômico, custo do ciclo de vida (CCV), com base na ISO 15686-5:2008, adaptadas para sistemas estruturais. De acordo com o escopo adotado, define-se quais variáveis desse elenco serão consideradas na ACCV.

Levando em consideração todos os custos de uma edificação, desde a sua aquisição, gestão, manutenção, até o eventual desmonte ou descarte, a ACCV é especialmente útil na comparação de várias alternativas de projetos, quando estes possuem os mesmos requisitos de desempenho, porém diferem quanto aos custos iniciais e aos custos operacionais. Com essa ferramenta de comparação, é possível selecionar o projeto com o melhor custo do ciclo de vida.

#### Quadro 4.2 - Variáveis que compõem o CCV (adaptado da ISO 15686-5:2008)

<p><b>Custo de aquisição:</b> constituem parte importante do CCV do sistema estrutural de novas edificações. Podem incluir: custos do terreno; de serviços temporários; de projeto e engenharia; de planejamento; de construção e terraplanagem; de comissionamento; de administração.</p>
<p><b>Custo de operação, manutenção, e substituição:</b> os objetivos principais de se estimar estes custos são:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- garantir que a vida útil seja otimizada para alcançar a vida útil de projeto (VUP);</li><li>- entender as implicações das opções consideradas</li></ul> <p>Questões a serem consideradas:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>O desempenho da estrutura ou partes dela, ao longo do tempo,</li><li>A identificação das datas prováveis de falhas/deterioração e se elas estão de acordo com os requisitos do cliente e regulamentos,</li><li>O trabalho requerido e custos associados à deterioração do desempenho,</li><li>A redução da vida útil da estrutura ou do elemento estrutural, resultante de determinada opção de manutenção,</li><li>Os custos requeridos por uma determinada opção de manutenção e operação que incorrem na fase de projeto (por exemplo, custos da estrutura referentes a elementos para prover acesso a limpeza e reposição),</li><li>Custos de gerenciamento e manutenção que tendem a ocorrer em períodos regulares curtos,</li><li>Custo de substituição que podem ocorrer em ciclos relativamente longos e podem ser analisados separadamente, ou como parte do custo de aquisição,</li></ol> <p>Obs.: estas questões devem acompanhar as mudanças e desenvolvimentos do projeto ou dos requisitos do cliente. Avaliação do CCV requer reconsideração ou revisão em diferentes estágios do ciclo de vida.</p> <p><b>Custo de manutenção preventiva,</b></p> <p><b>Custo de manutenção corretiva</b> (incluem eventos não previstos ou correções de falhas),</p> <p><b>Custo deferido</b> (uma decisão sobre tempo e urgência implica em custos consequentes).</p> <p><b>Custos de gerenciamento da manutenção:</b> envolvem inspeções cíclicas, (pesquisas das condições, inspeções específicas e condições de monitoramento) planejamento da manutenção (cronograma, recursos), e projeto e gerenciamento de substituições ou recuperações.</p> <p><b>Custos de limpeza e reparos menores</b></p> <p><b>Custos indiretos de manutenção:</b> de acordo com os requisitos do cliente a ACCV pode considerar alguns custos indiretos, tais como, interrupção do uso da edificação ou parte dela para reparos, com os custos associados a alternativas de acomodação.</p>
<p><b>Custos do fim de vida</b></p> <p>A ACCV deve incluir premissas sobre requisitos de desempenho que possam afetar os custos do fim de vida. Por exemplo, (i) assumir custos futuros com <b>disposição final</b>, dependendo do uso e do nível de poluição/contaminação provável de permanecer após a <b>demolição</b>, (ii) onde há necessidade de demolição de edificação existente para implantar o projeto, é necessário considerar práticas apropriadas e/ou melhores práticas de demolição, já nos estágios iniciais de projeto.</p>
<p><b>Valores residuais do fim de vida</b></p> <p>O valor residual deve ser avaliado conhecendo o valor atual de venda de edificações similares, comparáveis em idade e localização. Valores residuais positivos devem ser considerados no escopo da avaliação do custo global do ciclo de vida (ACGCV) ou <i>whole-life costing</i>. Porém, como eles podem ser substanciais, a decisão de incluir os custos do fim de vida no CCV pode demandar a consideração de valores residuais no CCV também. As condições da edificação ao final do período de análise podem impactar os valores residual e de disposição final e refletir a política de custos de manutenção adotada durante seu ciclo de vida.</p>

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Os indicadores econômicos com maior frequência de incidência na literatura são o custo do ciclo de vida (CCV); o retorno do investimento (*Payback period*, denominado simplificado de *payback*); e o apoio à economia local (ANDRADE; BRAGANÇA, 2011; HARTKOPF et al., 2009; JEONG; LEE, 2009; KONIG; CRISTOFARO, 2012; LIPPIAT; HELGESON, 2009; LUETZKERDORF et al., 2011; SANTOS; TENÓRIO, 2010).

O *apoio à economia local* é tratado em vários sistemas de avaliação ambiental de edificações como a quantidade de materiais extraídos ou produzidos num raio de até 800km e calculado pela percentagem do custo total de materiais empregados na estrutura, correspondente aos materiais de origem local.

O *payback* simples usa valores reais (sem desconto) para as verbas futuras, enquanto o *Payback* descontado utiliza valores presentes. O *Payback*, em geral, utiliza a relação de retorno - relação entre o custo de capital e o benefício anual gerado ( $\text{custo}(\$/\text{economia}(\$/\text{ano}))$ ) para uma alternativa única de projeto. Por esta razão, não é útil para classificação de múltiplas alternativas, com variações de perfis de custo e variações no capital (BARRINGER, 2003).

Comparando-se ambos os indicadores - CCV e *payback* simples – observa-se que o último ignora todos os custos e economias que ocorrem após o período de retorno ter sido alcançado (ISO 15686-5:2008), enquanto que o CCV inclui considerações de dois fatores adicionais: a vida útil da unidade em estudo e a taxa de desconto para o consumidor/usuário/empreendedor (SANTOS 2007; BUYS et al., 2011).

Enxergar uma edificação de maneira não convencional, por meio do conceito de seu ciclo de vida, cujo ponto de partida antecede a elaboração dos projetos e o término se estende além do término das obras, é um dos primeiros passos na busca da sustentabilidade.

Enquanto o custo inicial de projeto e construção (custo de aquisição) é um dos mais utilizados critérios de seleção de todos os sistemas construtivos das edificações, a consideração do custo do ciclo de vida da edificação - ou seja, a perspectiva de longo prazo - é um dos grandes desafios a serem vencidos para que a engenharia nacional se alinhe à tendência mundial na busca da sustentabilidade do ambiente construído.

Considerando-se todos os custos de uma edificação, desde a sua aquisição, gestão, manutenção, até o eventual desmonte ou descarte, a ACCV é especialmente útil na comparação de várias

alternativas de projetos, quando estas possuem os mesmos requisitos de desempenho, porém diferem quanto aos custos iniciais e aos custos operacionais e de manutenção. Com essa ferramenta de comparação, é possível selecionar o projeto com o melhor custo do ciclo de vida.

Com a intenção de avaliar o desempenho econômico de diferentes sistemas estruturais em concreto, pelas razões expostas, o custo do ciclo de vida, CCV, será o indicador econômico utilizado neste trabalho. Devido à falta de registros confiáveis de custos de projeto para a desmontagem e de alternativas de pós-uso, os custos de fim de vida não serão considerados no cálculo do CCV, sendo essa decisão amparada pela ISO 15686-5:2008. Desta forma, dentre as variáveis que compõem o CCV, serão considerados os custos de aquisição e de manutenção e reparos dos sistemas estruturais.

Na sequência, o Capítulo 5 apresenta a abordagem metodológica utilizada no desenvolvimento deste trabalho.





## 5 ABORDAGEM METODOLÓGICA

### 5.1 INTRODUÇÃO

De acordo com Yin (2010), a seleção do método apropriado para a condução de uma pesquisa depende do tipo de questão da pesquisa, da extensão do controle que o investigador tem sobre os eventos comportamentais reais, e do grau de enfoque sobre os fenômenos contemporâneos, em oposição aos históricos. Dentre os principais métodos de pesquisa, o estudo de caso tende a ser o mais indicado quando as questões “*como*” ou “*por que*” são propostas, quando o investigador tem pouco controle sobre os eventos e quando se trata de um fenômeno contemporâneo no contexto da vida real.

Considerando que esta pesquisa busca responder às questões “*como*” e que não se terá controle sobre os processos de seleção, projeto e construção e que, além disso, a pesquisa trata de eventos contemporâneos - sistemas estruturais usuais em concreto das tipologias vertical, residencial e comercial em ambiente marinho do sudeste brasileiro (Vitória, ES, e Rio de Janeiro, RJ) - decidiu-se pela adoção do método de estudo de caso para sua condução.

A revisão bibliográfica sobre sustentabilidade aborda temas multidisciplinares, tendo em vista que seu conceito envolve as dimensões ambiental, econômica e social (UNEP/SETAC, 2011), além da funcional e técnica, igualmente relevantes no caso das edificações (LUETZKENDORF et al., 2011a; HAKKINEN, 2012). A partir do conceito de desempenho aplicado às edificações, requisitos de desempenho atribuídos ao sistema estrutural, com base na ABNT NBR 15575: 2013 e nas ISO 6240:1980; ISO 6241:1984; ISO 9699:1994, foram pesquisados.

Em virtude do atual consenso da comunidade científica quanto à necessidade de desenvolver avaliações orientadas a desempenho, chegou-se à relevância do tema indicadores de desempenho. Estes foram pesquisados e selecionados na literatura, com base, num primeiro momento, na metodologia proposta para desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para edificações das ISO/TS 21929-1:2006; ISO 15392:2008 e ISO 21931-1:2010, contando, posteriormente, com o apoio das BS EN 15643-2:2011 para avaliação ambiental das edificações e, mais recentemente a EN 15804:2012 (E) que regulamenta as declarações ambientais dos produtos (EPDs) da

construção, de acordo com a BS EN ISO 14025. Para tanto, as técnicas de ACV e ACCV foram pesquisadas.

A ISO 15392:2008 apresenta os princípios gerais de sustentabilidade relativos ao setor de construção civil, enquanto a especificação técnica, ISO/TS 21929-1: 2006 adapta para as edificações, os princípios gerais de sustentabilidade e dá suporte ao processo de escolha e utilização dos indicadores para edificações, dentre outros objetivos.

A ISO 21931-1: 2010, por sua vez, fornece a estrutura geral para aumentar a qualidade e comparabilidade de métodos de avaliação do desempenho ambiental das edificações e dos serviços externos a eles relacionados. Identifica e descreve questões a serem consideradas no desenvolvimento e uso de métodos de avaliação de desempenho ambiental de edificações novas ou existentes, relativas aos estágios de projeto, construção, operação, manutenção, reformas, e desconstrução.

Após a revisão bibliográfica, definiu-se a abordagem metodológica para o desenvolvimento e seleção de um conjunto de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico para sistemas estruturais em concreto e sua validação em edificações verticais residenciais e comerciais brasileiras em ambiente marinho, com o objetivo de diferenciar seu desempenho e embasar a tomada de decisão quanto a sua seleção.

A Figura 5.1 mostra o fluxograma referente às etapas da abordagem metodológica, extraído da Figura 1.1 (Capítulo 1) e o detalhamento das atividades que compõem cada etapa é descrito nas seções seguintes.

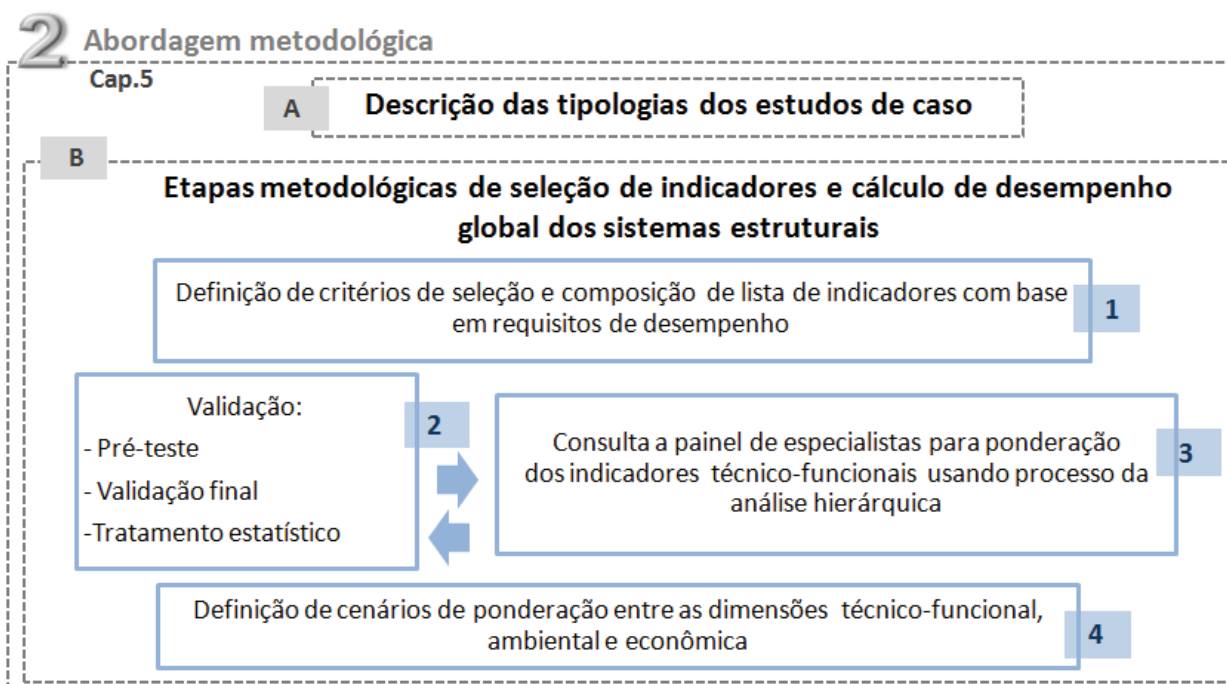


Figura 5.1 - Fluxograma das etapas da abordagem metodológica

## 5.2 DESCRIÇÃO DAS TIPOLOGIAS CONSTRUTIVAS DOS ESTUDOS DE CASO

A tipologia *edificações verticais, residenciais e comerciais em concreto*, foi selecionada para validar o conjunto de indicadores de desempenho por duas razões principais: (1) edifícios residenciais são o produto de maior peso individual da indústria da construção no Brasil, que correspondeu a R\$ 44,2 bilhões de reais em 2011 (IBGE PAIC 2011); e (2) o consumo nacional de cimento e a produção nacional de aços laminados longos, ambos em toneladas, são os principais indicadores da construção civil (CBIC, 2012), atestando a predominância das construções em concreto armado no país. O consumo de concreto no ano de 2011, foi de R\$5,35 bilhões de reais e o de vergalhões no país foi de R\$4,15 bilhões de reais (IBGE PAIC 2011).

Os sistemas estruturais em concreto armado e misto (concreto armado com lajes protendidas) – foram escolhidos, por representarem, atualmente, a concepção estrutural mais utilizada pelas construtoras capixabas para as tipologias residencial e comercial. Essa informação foi fornecida por depoimento de empreendedores e engenheiros responsáveis pelos projetos estruturais dos estudos de caso. Portanto, foram escolhidos por exemplificarem a prática usual destas tipologias.

### 5.2.1 Caracterização dos estudos de caso

São sistemas estruturais de edificações residenciais e comerciais (hotéis e escritórios) usuais, existentes ou em construção, cujos projetos foram desenvolvidos por escritórios capixabas no período de 2004 a 2012.

Situam-se em regiões marinhas do sudeste brasileiro, onde 30 (trinta) edificações se localizam nas cidades de Vitória e Vila Velha, Espírito Santo, e 1 (uma) na Barra da Tijuca, no Estado do Rio de Janeiro, com sistemas estruturais em concreto armado e misto (pilares, vigas e fundações em concreto armado e lajes em concreto protendido). Os sistemas estruturais mistos serão referidos no texto como sistemas em concreto protendido. As fundações foram desconsideradas nesta pesquisa para evitar que as diferenças de capacidade de carga dos solos, que definem seu dimensionamento, interfiram nos quantitativos de materiais e impactos correspondentes.

Os sistemas de lajes variam de sistemas em concreto armado com lajes convencionais maciças e vigas, lajes nervuradas com e sem vigas, a sistemas em concreto protendido com lajes lisas e lajes nervuradas com vigas chatas. O número de pavimentos varia de 6 (seis) a 30 (trinta) pavimentos (desconsiderados os níveis de caixa d'água e casa de máquinas), com resistências características do concreto (fck) especificadas nos projetos de 25MPa, 30MPa e 35MPa.

O Quadro 5.1 mostra um resumo das tipologias das edificações que compõem os estudos de caso. São trinta e um sistemas estruturais, dos quais, onze são de lajes em concreto armado e vinte de lajes em concreto protendido.

**Quadro 5.1 - Resumo das tipologias das edificações e dos sistemas estruturais correspondentes**

Edificações	lajes em concreto armado (CA)	lajes em concreto protendido (CP)	Total
<b>Residenciais</b>	11	15	26
<b>Comerciais</b> (escritórios e hotéis)	0	5	5
<b>Total</b>	11	20	31

Os sistemas de lajes em concreto armado analisados neste estudo pertencem às edificações residenciais, que também possuem exemplos de lajes em concreto protendido, conforme descrito no Quadro 5.2.

**Quadro 5.2 - Diferentes sistemas de lajes das edificações de tipologia residencial**

Edificações		Pavimento-tipo em concreto armado (CA)		
Residenciais	total	Laje convencional (maciça com vigas)	Laje nervurada c/ vigas (chata e normal)	Lajes nervuradas cogumelo
		6	2	3
	Pavimento-tipo em concreto protendido (CP)			
	total	Laje lisa = laje plana (sem vigas)	Laje nervurada com vigas chatas	
14		1		

As edificações comerciais, por sua vez, utilizam lajes em concreto protendido, como mostra o Quadro 5.3.

**Quadro 5.3 - Sistemas de lajes das edificações de tipologia comercial**

Edificações Comerciais		Pavimento-tipo em concreto protendido (CP)	
		Laje lisa (sem vigas) = laje plana	Laje nervurada com vigas chatas
		4	1

A amostra final composta por um total de 31 (trinta e um) estudos de caso, incluindo as três edificações (Ed A, Ed B e Ed C) usadas no pré-teste está indicada no Quadro 5.4, que mostra as principais características dos sistemas estruturais estudados.

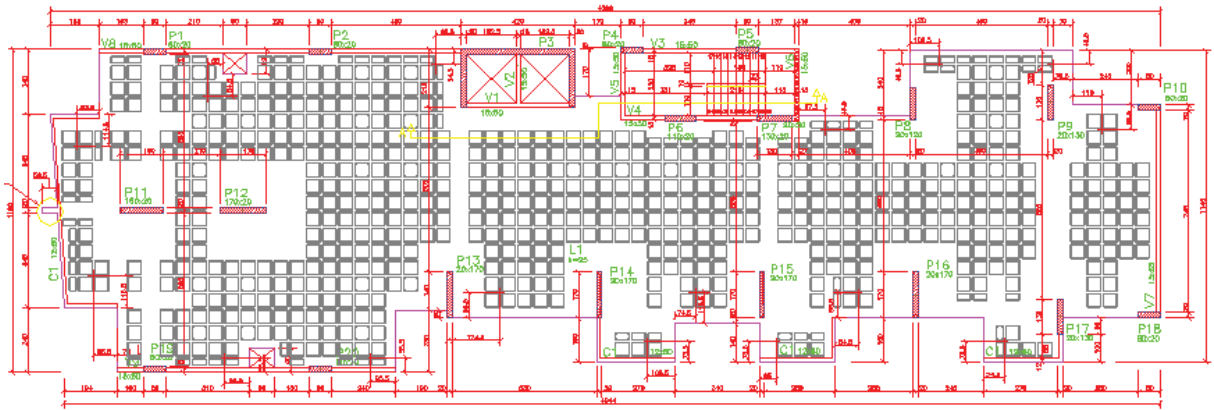
**Quadro 5.4 - Descrição das edificações contendo identificação, tipologia, ano do projeto, número de pavimentos, tipo de lajes do pavimento-tipo e resistência característica à compressão do concreto especificada em projeto**

Edificação	Tipologia	Ano do projeto	Nº total de pavimentos*	Sistema estrutural dos pavimentos-tipo		
				CA ou CP	Sistema de lajes	fck [MPa]
Ed A	R	2004	6	CA	laje nervurada c/ vigas chatas	30
Ed B	R	2007	15	CP	laje lisa	30
Ed C	R	2009	6	CP	laje lisa	30
Ed D	R	2011	23	CP	laje lisa	30
Ed E	R	2011	18	CP	laje lisa	30
Ed F	C	2011	18	CP	laje lisa	30
Ed G	R	2005	7	CA	laje convencional*	30
Ed H	R	2009	7	CA	laje convencional	30
Ed I	R	2004	16	CA	laje convencional	25
Ed J	R	2012	23	CP	laje lisa	30
Ed k	R	2009	23	CA	laje nervurada cogumelo	30
Ed L	R	2007	7	CA	laje nervurada c/ vigas normais	30
Ed M	R	2007	19	CP	laje lisa	30
Ed N	R	2009	19	CP	laje lisa	30
Ed O	R	2012	17	CA	laje nervurada c/ vigas chatas	30
Ed P	R	2008	24	CP	laje nervurada c/ vigas chatas	30
Ed Q	R	2007	10	CA	laje convencional	30
Ed R	C	2011	17	CP	laje lisa	30
Ed S	C	2008	30	CP	laje lisa	30
Ed T	R	2004	12	CA	laje convencional	30
Ed U	R	2010	12	CP	laje lisa (vedação tipo drywall)	30
Ed V	R	2011	16	CA	laje nervurada cogumelo	30
Ed X	R	2010	18	CP	laje lisa	30
Ed Z	R	2007	11	CA	laje convencional	30
Ed AA	R	2005	15	CP	laje lisa	30
Ed AB	C	2012	18	CP	laje lisa	35
Ed AC	R	2010	21	CP	laje lisa	30
Ed AD	R	2008	20	CP	laje lisa	30
Ed AE	C	2007	21	CP	laje nervurada c/ vigas chatas	30
Ed AF	R	2009	20	CP	laje lisa	30
Ed AG	R	2010	9	CP	laje lisa	30

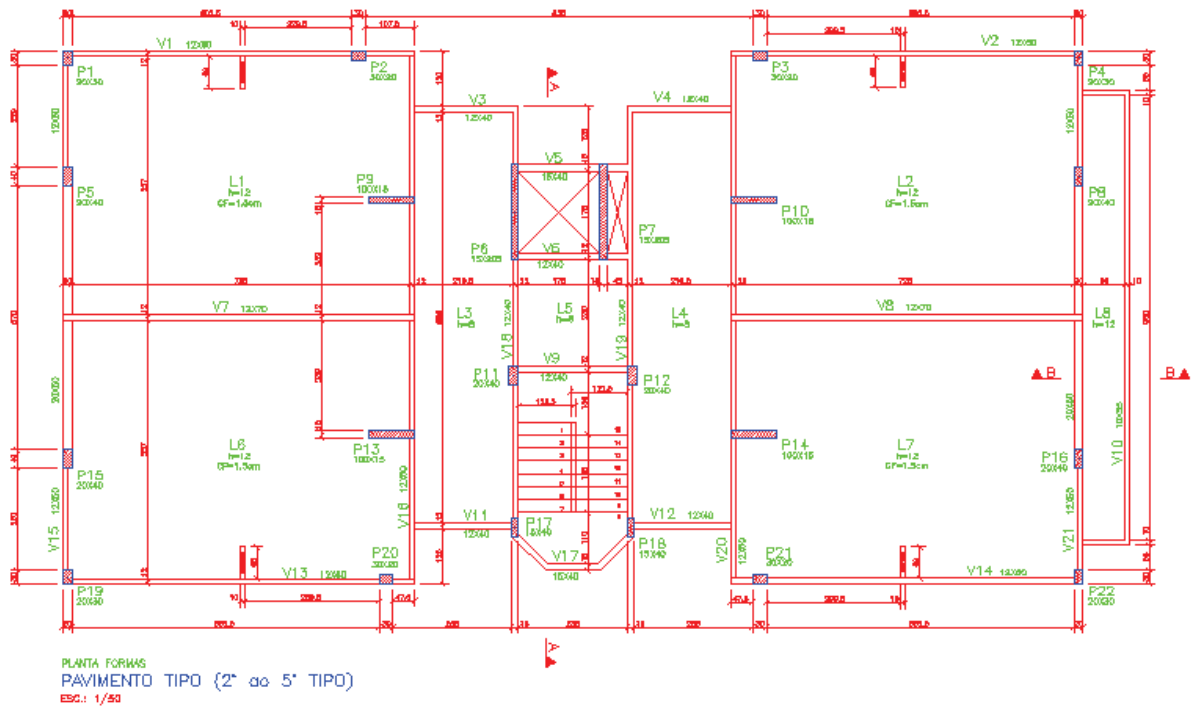
CP = concreto protendido; CA = concreto armado; laje lisa = laje plana protendida; laje convencional = laje maciça c/ vigas; laje cogumelo = laje sem vigas; viga chata = viga com altura igual a da laje.

\*excluindo-se pavimento de casa de máquinas e caixa d'água

A Figura 5.2 mostra exemplos dos diferentes sistemas de lajes de pavimento-tipo estudados.

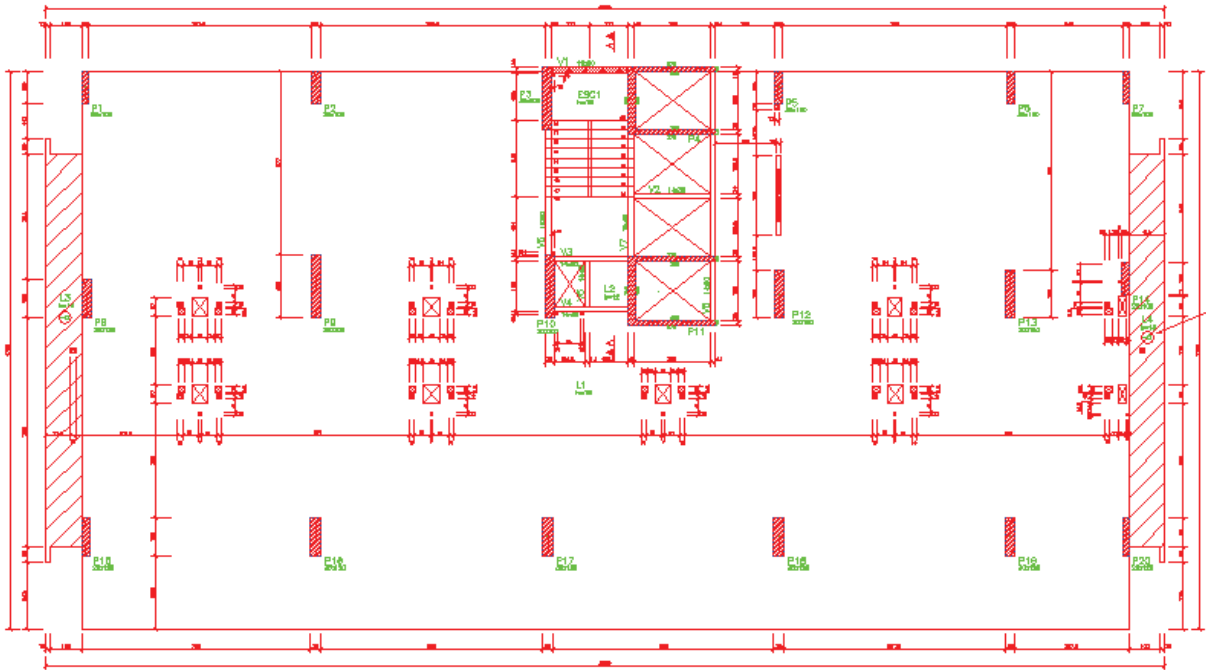


a) Laje nervurada com vigas chatas (Ed. O)

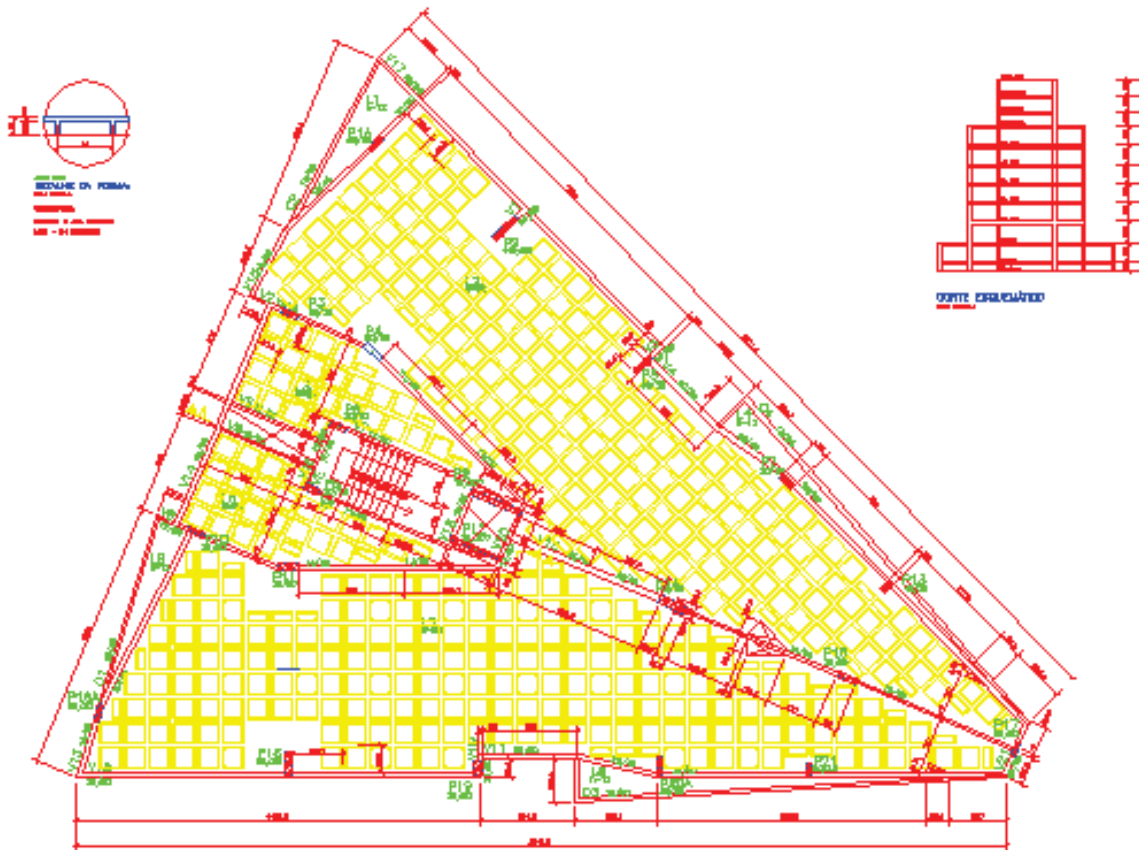


b) Laje convencional (maciça com vigas) (Ed.G)

Figura 5.2 - Exemplos de sistema estrutural de pavimento-tipo em (a) laje nervurada com vigas chatas em concreto armado ou protendido, (b) laje convencional em concreto armado, (c) laje lisa em concreto protendido, (d) laje nervurada com vigas em concreto armado (e) laje nervurada cogumelo em concreto armado



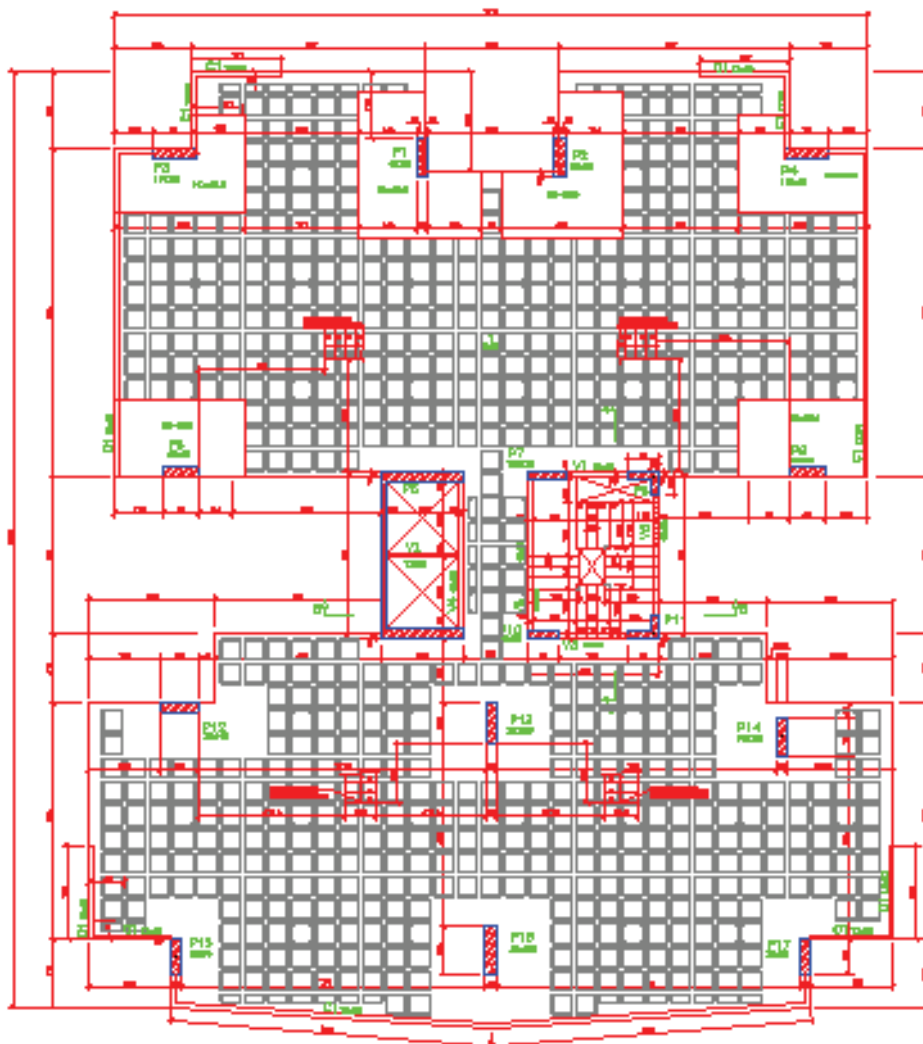
c) Laje lisa (plana protendida) (Ed. F)



d) Laje nervurada com vigas normais (Ed. L)

Figura 5.2 - Exemplos de sistema estrutural de pavimento-tipo em (a) laje nervurada com vigas chatas em concreto armado ou protendido, (b) laje convencional em concreto armado, (c) laje lisa em concreto protendido, (d) laje nervurada com vigas em concreto armado (e) laje nervurada cogumelo em concreto armado (cont.).





e) Laje nervurada cogumelo (Ed. V)

**Figura 5.2 - Exemplos de sistema estrutural de pavimento-tipo em (a) laje nervurada com vigas chatas em concreto armado ou protendido, (b) laje convencional em concreto armado, (c) laje lisa em concreto protendido, (d) laje nervurada com vigas em concreto armado (e) laje nervurada cogumelo em concreto armado (cont.).**

### **5.3 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E COMPOSIÇÃO DE LISTA DE INDICADORES COM BASE EM REQUISITOS DE DESEMPENHO (ETAPA 1)**

#### **5.3.1 Critérios para composição e seleção de indicadores**

Os critérios para seleção de indicadores de sistemas estruturais foram definidos com base na literatura e na metodologia proposta para desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para edificações das ISO/TS 21929-1:2006; ISO 21931-1:2010 e ISO 15392:2008.

As inúmeras metodologias propostas para seleção de indicadores do setor de edificações (ALWAER, CLEMENTS-CROOME, 2009; SOETANTO et al., 2004; 2006; HAROGLU et al., 2009; GYADU-ASIEDU et al., 2009) utilizam uma hierarquia de requisitos e critérios, com base na literatura, em levantamentos entre as partes interessadas e consulta a painel de especialistas, tentando atribuir pesos aos requisitos considerados mais importantes.

Sintetizando os principais critérios de seleção de indicadores encontrados na literatura, o Quadro 5.5, Quadro 5.6 e Quadro 5.7 apresentam, respectivamente, critérios gerais (ROYUELA, 2001; SEGNESTAM, 2002; OECD, 2003), critérios sugeridos por Malmqvist e Glaumann (2006) envolvendo considerações teóricas e práticas, e critérios de seleção de indicadores de sistemas construtivos de edificações (BURGER et al., 2009; SCHMIDT-BLEEK, 2009; GILJUM et al., 2006).

**Quadro 5.5 - Principais critérios para seleção de indicadores (a partir de ROYUELA, 2001; SEGNESTAM, 2002; OECD, 2003)**

Principais critérios para seleção de indicadores
Representatividade
Relevância à escala da análise (espacial e temporal)
Adequabilidade às necessidades do grupo alvo (especialistas, gestores públicos, público em geral, etc.).
Pertinência aos objetivos do planejamento
Facilidade de compreensão, clareza, simplicidade e ausência de ambiguidades
Viabilidade, dentro do contexto da disponibilidade de dados e grandeza de custos e tempo de obtenção
Possibilidade de captação de mudanças
Comparabilidade em nível internacional ( baseado em padrões internacionais e com consenso internacional sobre sua validade)
Abrangência de escopo
Existência de valores de referência para dar significado aos valores que assume
Existência de fundamentação científica
Possibilidade de ser utilizado em modelos econômicos, de previsão, e em sistemas de informação
Adequabilidade da documentação
Regularidade de atualização
Capacidade de cumprir suas funções

**Quadro 5.6 - Critérios científicos e práticos na escolha de indicadores (MALMQVIST, GLAUMANN, 2006)**

Critérios científicos	Critérios práticos
<b>Validade:</b> o indicador mede o problema no seu ponto final, como deve ser medido, até a extensão desejada.	<b>Custos</b> para aquisição de dados e seu processamento.
<b>Confiabilidade:</b> a aquisição de dados e o processo de cálculo são regulados de tal modo que o mesmo valor seja obtido, independente de quem efetue o processo.	<b>Demandas por competência</b>
<b>Acurácia:</b> é o nível desejado de precisão do indicador.	<b>Inteligibilidade:</b> o significado do indicador deve ser fácil de comunicar.
	<b>Influência:</b> a extensão até onde a própria instituição pode influenciar o valor do indicador.

**Quadro 5.7 - Critérios para seleção de indicadores de desempenho de sistemas construtivos (a partir de SCHMIDT-BLEEK, 2009; GILJUM et al., 2006; BURGER et al., 2009)**

Critérios para seleção de indicadores de desempenho ambiental e/ou funcional e/ou econômico de sistemas construtivos	
1. abranger as principais categorias ambientais /funcionais /econômicas e apresentá-las de modo dissociado.	2. permitir a comparação de seu resultado com metas ambientais/funcionais/econômicas regionais, nacionais ou internacionais.
3. prover informação confiável sobre o desempenho ambiental /funcional /econômico do produto ou serviço	4. permitir que o consumo de recursos necessário à sua produção seja quantificado em valores absolutos e relativo à escassez de todos os recursos naturais.
5. permitir verificação direta, com transparência no sistema de cálculo, nos limites de aplicação e na fonte de dados.	6. permitir a identificação dos pontos principais para melhoria da eficiência de recursos e redução dos seus impactos.
7. permitir uma avaliação dos efeitos ambientais / funcionais /econômicos ao longo de todo o ciclo de vida do sistema construtivo.	8. permitir, no caso de um conjunto de indicadores, sua associação, desde que calculados de modo independente.
9. permitir sua aplicação prática a uma ampla gama de sistemas construtivos, a um tempo e custo viáveis.	10. ser de fácil compreensão e comunicação para os agentes tomadores de decisão.

A utilização de todos os critérios mencionados, no entanto, nem sempre é possível. A OECD que monitora o desenvolvimento dos diversos setores da sociedade por meio de *indicadores ambientais-chave* (OECD, 2003) e informa com publicações anuais os resultados encontrados, observa que as características dos indicadores apresentados no Quadro 5.5 os qualificam como indicador ideal, e que nem sempre serão alcançadas (OECD, 2008).

Com base no exposto, foram definidos os critérios de seleção de indicadores (Quadro 5.8) técnico-funcionais e econômico de sistemas estruturais utilizados nesta pesquisa. Os indicadores ambientais foram definidos com base na BS EN 15643-2:2011, contemplando os indicadores

recomendados na EN 15804:2012.

**Quadro 5.8 - Critérios de seleção de indicadores de desempenho de sistemas estruturais**

Critérios Eliminatórios	Justificativa
Representatividade	Capacidade de representar adequadamente o elemento de representação em questão.
Relevância	Capacidade de monitorar desempenho e permitir comparação entre soluções distintas.
Confiabilidade	Capacidade de rastrear a aquisição de dados e o processo de cálculo, isto é, regulá-los de modo a que o mesmo valor seja obtido, independentemente de quem efetue o processo.
Adequação ao Desempenho	Indicadores correspondentes a requisitos de desempenho que possam ser mais bem atendidos por outros sistemas construtivos da edificação foram excluídos da seleção, visando à redução do número de indicadores do conjunto.
Mensuração	Capacidade de obtenção do indicador, ou seja, disponibilidade de dados para cálculo.
Simplificação / Objetividade	Facilidade de obtenção: simplicidade na obtenção dos resultados
Comunicabilidade	Capacidade de descrever desempenho das várias alternativas de sistema estrutural.
Critério Classificatório	Justificativa
Embasamento anterior	Frequência de incidência na literatura

### 5.3.2 Requisitos de desempenho atribuídos ao sistema estrutural

Uma lista preliminar de indicadores ambientais, técnico-funcionais e econômicos foi composta a partir da revisão bibliográfica e de *requisitos de desempenho* preconizados na ABNT NBR 15575:2013 e nas ISO 6240:1980; ISO 6241:1984; ISO 9699:1994, dentre os quais foram excluídos aqueles mais bem atendidos por outros sistemas construtivos da edificação, e com base na metodologia proposta para desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para edificações da ISO/TS 21929-1:2006, e nas ISO 15392:2008 e ISO 21931-1:2010.

A *segurança* é o requisito mais importante do sistema estrutural, que tem como objetivo suportar, adequadamente, ele próprio e todos os demais sistemas construtivos que compõem a edificação. *Segurança estrutural* engloba resistência, estabilidade e deformações do sistema estrutural e partes dele, quando submetido às solicitações características de acordo com as prescrições das ABNT NBR 8681:2004 , ABNT NBR 6120:1980 e ABNT NBR 6123:1988 e considerando os limites definidos na ABNT NBR6118:2007 e ABNT NBR 15575:2013.

A *segurança contra incêndio*, por sua vez, é estabelecida para períodos requeridos de resistência ao fogo dos elementos estruturais em função do uso da edificação (ABNT NBR 14432:2001).

Com base no *método Tabular* da ABNT NBR 15200:2004 de estruturas de concreto em situação de incêndio, são definidos dimensões e cobrimentos mínimos para lajes, vigas e pilares expostos ao fogo, que variam em função do uso da edificação e do número de pavimentos. Com a aplicação deste método, a verificação de atendimento ao requisito é simples e direta, dispensando, portanto, a utilização de indicadores cuja função principal é simplificar, quantificar e comunicar.

A *durabilidade* do sistema estrutural é fundamental para garantir sua vida útil e a da própria edificação, em virtude dele ser considerado de difícil substituição. A *vida útil de projeto* (VUP) é um critério de desempenho para avaliar o requisito de durabilidade (ABNT NBR 15575-2:2013). A VUP adotada para todos os estudos de caso foi a vida útil mínima requerida pela ABNT NBR 15575-2:2013, igual a 50 anos, verificada a partir do cálculo da vida útil estimada (VUe) com base em modelos de previsão de vida útil.

O sistema estrutural é lançado para atender ao projeto arquitetônico, evitando interferência na distribuição dos espaços. Dada a grande extensão de sua vida útil, seu lançamento deve permitir ainda, a adaptabilidade da distribuição original, possibilitando mudanças no seu uso ao longo da vida útil da edificação. Além disso, embora ainda não seja praticada nas estruturas de concreto no país, a *adaptabilidade ao uso* pode ser contemplada em uma concepção de projeto que vise também à desmontagem, com elementos estruturais pré-fabricados com ligações adequadas, que possibilitem o reuso.

*Adaptabilidade* está relacionada ao desempenho técnico de partes da edificação. Nesse contexto, pode ser definida como uma mudança física com o propósito de aumentar a flexibilidade ao uso. Modulação, padronização de componentes, acessibilidade à desmontagem e dissociação técnica e funcional são fatores importantes para definir a facilidade de adaptabilidade do sistema estrutural (GIJSBERS, et al, 2009).

A escolha do sistema estrutural possui grande influência no valor que o cliente atribui à edificação, porquanto o referido sistema determina o grau de funcionalidade e de adaptabilidade futura da edificação e da velocidade de execução, função da sua *construtibilidade*, com um enorme impacto no desempenho da edificação completa, seja no curto ou longo prazo (SOETANTO et al., 2006).

Como a ABNT NBR 15575-1:2013 não detalha o requisito de *adequação ambiental*, os indicadores de desempenho ambiental foram definidos com base na BS EN 15643-2:2011 para

avaliação ambiental das edificações e na recente norma europeia para regulamentação das declarações ambientais de produtos (EPDs), EN 15804:2012 (E), que recomendam o uso de indicadores predeterminados com base em ACV, que possuam base científica acordada para a normalização europeia.

Considerando que o desempenho ambiental é definido como o desempenho relacionado a aspectos ambientais de obras, partes delas, processos ou serviços relacionados a seu ciclo de vida que podem causar alteração do meio ambiente, e a impactos ambientais que significam qualquer alteração do ambiente, adversa ou benéfica, total ou parcialmente resultante dos aspectos ambientais (BS EN 15643-2:2011), os indicadores propostos nesta tese foram associados à intensidade do uso de recursos (aspectos ambientais) e aos impactos ambientais correspondentes a determinadas categorias de impacto das ACV, de acordo com a BS EN 15643-2:2011.

Construtoras e projetistas buscam incessantemente reduzir *os custos de produção* das edificações, quer racionalizando os projetos, quer implantando novas tecnologias construtivas, que muitas vezes, acabam melhorando o desempenho do produto final. No caso do sistema estrutural em concreto, seu custo é função de inúmeras variáveis, o que dificulta o estabelecimento de indicadores simples e confiáveis para defini-lo (BATLOUNI NETO, 2011).

Procurar aumentar a produtividade no canteiro de obras e conseqüentemente, reduzir *custos de produção e de mão-de-obra* é, na verdade, uma forma de manter a competitividade das empresas de construção (BATLOUNI NETO, 2011). Embora seja essencial para a evolução da engenharia civil, e da construção de edificações, não é suficiente para garantir o desempenho, a qualidade e a otimização dos custos do seu produto final ao longo do ciclo de vida.

O *custo do ciclo de vida* (CCV) do sistema estrutural, embora não tão expedito, é o único que contempla todos estes aspectos e, portanto, é o indicador associado ao *requisito de economia* proposto nesta tese. Foi definido com base na literatura e calculado segundo a ISO 15686-5:2008 que dá as diretrizes para a realização da avaliação de custos do ciclo de vida (ACCV) da edificação ou partes dela, para previsão e avaliação do seu desempenho econômico.

Desta forma, segurança estrutural, adaptabilidade ao uso, construtibilidade, durabilidade, manutenibilidade, adequação ambiental e economia foram os requisitos de desempenho atribuídos ao sistema estrutural, para os quais os indicadores técnico-funcionais, ambientais e o econômico foram selecionados.

### 5.3.3 Conjunto de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico proposto para sistemas estruturais verticais em concreto

Filtrados pelos critérios de seleção (Quadro 5.8) a lista de indicadores associados aos requisitos de desempenho foi submetida a uma validação preliminar (Pré-teste). O Quadro 5.9 mostra a lista final de indicadores validados no pré-teste.

**Quadro 5.9 - Lista final de indicadores de desempenho de sistemas/elementos estruturais em concreto validada pelo Pré-teste**

Indicadores de desempenho de sistemas / elementos estruturais	
<p><b>Ambientais</b> (associados ao requisito de adequação ambiental: contemplando aspectos (intensidade do uso de recursos) e impactos ambientais (categorias de impacto da ACV).</p>	<p><b>1. Potencial de aquecimento global (EGWP)</b> [<math>\text{kgCO}_{2\text{-eq}} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>2. Energia primária incorporada renovável (EE<sub>ren</sub>)</b> [<math>\text{MJ} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>3. Energia primária incorporada não renovável (EE<sub>n ren</sub>)</b> [<math>\text{MJ} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>4. Pegada de água azul (bWF)</b> [<math>\text{m}^3 / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>5. Consumo de recursos materiais (Mc)</b> [<math>\text{kg} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>] (aços + concreto + fôrmas de madeira compensada).  <b>6. Conteúdo não renovável (Conteúdo Abiótico) (NRC)</b> [<math>(\text{kg}_{\text{material total}} - \text{kg}_{\text{reciclado}} - \text{kg}_{\text{reutilizado}}) / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>7. Potencial de acidificação (AP)</b> [<math>\text{kg SO}_{2\text{-eq}} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>8. Potencial de eutrofização (EP)</b> [<math>\text{kg (PO}_4\text{)}_{3\text{-eq}} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>9. Potencial de depleção da camada estratosférica de ozônio (ODP)</b> [<math>\text{kg CFC}_{11\text{-eq}} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>10. Potencial formação de ozônio fotoquímico (POCP)</b> [<math>\text{kg C}_2\text{H}_4\text{-eq} / \text{uf} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]</p>
<p><b>Econômico</b> (associado ao requisito economia: fluxo monetário no ciclo de vida)</p>	<p><b>1. Custo do ciclo de vida, CCV</b> [<math>\\$/\text{m}^2_{\text{AE}}</math>]:  Custo inicial de projeto e construção (<b>custo de aquisição</b>) e <b>custo de manutenção e reparos</b>.  Obs.: custos de fim de vida (reciclagem e reuso; demolição e disposição final) não foram considerados nas ACCV desta pesquisa (item 5.6.2.3, capítulo 5).</p>
<p><b>Técnico-Funcionais</b> (associados aos requisitos de desempenho: segurança estrutural, adaptabilidade ao uso, construtibilidade, manutenibilidade, durabilidade)</p>	<p><b>1. Relação entre volume de concreto e área estrutural (consumo de concreto = espessura equivalente)</b> [<math>\text{m}^3 / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>2. Relação entre massa de aço e área estrutural (consumo de aço)</b> [<math>\text{kg} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>]  <b>3. Relação entre altura e vão por unidade de área estrutural</b> (<math>\text{h}/\ell</math>)/<math>\text{m}^2_{\text{AE}}</math> para a direção considerada (aplicável principalmente a lajes), [<math>\text{m}^{-2}_{\text{AE}}</math>]  <b>4. Relação entre número de pilares e área estrutural do pavimento (Densidade de pilares)</b> <math>n^{\circ} / \text{m}^2_{\text{AE}}</math>, [<math>\text{m}^{-2}_{\text{AE}}</math>]  <b>5. Relação entre altura de viga e laje por unidade de área estrutural</b> (<math>h_v/h_\ell</math>)/<math>\text{m}^2_{\text{AE}}</math>, (<math>\text{m}/\text{m}</math>)/<math>\text{m}^2_{\text{AE}}</math>, [<math>\text{m}^{-2}_{\text{AE}}</math>]  <b>6. Potencial de reuso*</b>: Relação entre volume total projetado e volume pré-fabricado com ligações para desmontagem por unidade de área estrutural % volume/<math>\text{m}^2_{\text{AE}}</math>, [<math>\text{m}^{-2}_{\text{AE}}</math>]</p>

\*Embora constante na lista, o indicador *Potencial de reuso* não foi validado, pois as estruturas dos estudos de caso foram todas moldadas *in loco*, e seus projetos não foram desenvolvidos visando a desmontagem.

## 5.4 VALIDAÇÃO (ETAPA 2)

### 5.4.1 Pré-teste

A amostra foi composta por dois estudos de caso:

Estudo de caso 1 - referente ao elemento estrutural – pilar térreo de edificação vertical, representando tanto a tipologia residencial quanto comercial; e

Estudo de caso 2 – referente aos sistemas de pavimento-tipo de três edificações com tipologia residencial, sendo um pavimento-tipo em lajes nervuradas de concreto armado com vigas chatas de edificação com 6 pavimentos, e outros dois em lajes planas protendidas de edificações com 6 e 15 pavimentos.

A escolha da amostra teve por objetivo verificar:

- (i) a possibilidade de comparar o desempenho nos níveis do elemento estrutural (diferentes alternativas de pilares), de subsistema estrutural (sistemas de lajes em concreto) e da superestrutura completa de edificações nas referidas tipologias; e
- (ii) a representatividade dos resultados dos indicadores ambientais dos pavimentos-tipo em relação à superestrutura, analogamente à prática comum de projeto estrutural, que considera os índices de consumo material do pavimento-tipo como representativo de toda a superestrutura. Para verificar a influência do número de pavimentos na avaliação dessa representatividade, foram selecionados dois sistemas de pavimentos-tipo iguais pertencentes a edificações com diferentes números de pavimentos.

No pré-teste, a lista preliminar filtrada de indicadores foi aplicada a dois estudos de caso para validação preliminar dos indicadores e das unidades funcionais, e envolveu as seguintes atividades:

- a) Investigação da unidade funcional mais adequada;
- b) Utilização da plataforma de apoio à ACV, SimaPro 7.3, para cálculo dos indicadores ambientais referentes aos materiais estruturais: 1m<sup>3</sup> de concreto, 1m<sup>3</sup> de madeira compensada resinada, 1 tonelada de aço tipo CA-50, 1 tonelada de aço tipo CP-190, 1 tonelada de ferro fundido (placas e cunhas para ancoragens de protensão), aço laminado a quente e aços de baixa liga para perfis metálicos.



- c) Emprego do *software Life-365 v.2.1.1*<sup>1</sup> para estimar a vida útil dos sistemas estruturais (VUe). Os cálculos do CCV foram realizados com o mesmo *software*, com adaptações para também atender às diretrizes da ISO 15686-5: 2008.

O *Life-365* é um *software* de modelagem de vida útil que estima o período de iniciação da corrosão das armaduras e os custos do ciclo de vida das estruturas de concreto armado expostas a cloretos. Este *software* foi originalmente desenvolvido sob os auspícios de um consórcio estabelecido pelo *American Concrete Institute* (ACI), ao final da década de 90, como um primeiro passo no desenvolvimento de um modelo abrangente de previsão de custos do ciclo de vida associados às estruturas de concreto armado expostas a cloretos. Desde o lançamento da primeira versão, em outubro de 2000, ele foi largamente utilizado nos EUA (EHLEN, 2012; SILVA et al, 2010). Esta tese utiliza a versão v.2.1.1, disponibilizada em agosto de 2012.

- d) Desenvolvimento de planilha eletrônica em MS Excel para cálculo dos indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico, considerando: dados geométricos dos projetos, quantitativos de material e estimativas de custos iniciais; previsão de materiais e custos de reparos; vida útil estimada (VUe) e CCV obtidos com o *Life-365 v2.1.1* (EHLEN, 2012); resultados das ACV dos materiais conforme descrito no item b); vida útil de projeto mínima requerida, VUP.

## 5.4.2 Validação final

### 5.4.2.1 Equivalência funcional

ACVs relacionam impactos ambientais à função de um sistema de produto. Para tanto, é necessário expressar a função, em termos quantitativos, como uma unidade funcional. Para aplicação de ACV visando à avaliação de edificações ou de partes dela, recomenda-se o uso de equivalência funcional. Isto requer que os principais requisitos funcionais sejam descritos juntamente com o uso pretendido e requisitos técnicos específicos relevantes, formando a base para uma comparação coerente e transparente (CROWHURST et al., 2010; BS EN 15643-2:2011).

Nesta tese, o equivalente funcional é dado por:  $m^2$  de área estrutural de edificação vertical de uso residencial e comercial, exposição a ambiente marinho e vida útil de projeto (VUP) de 50 anos, a

---

<sup>1</sup> <http://www.life-365.org/>

qual, segundo a ABNT NBR 15575-2:2013, é um critério de desempenho para avaliar o requisito de durabilidade.

A VUP de 50 anos adotada nesta tese, é a vida útil mínima requerida para edificações residenciais<sup>2</sup> na referida norma e foi verificada a partir do cálculo da vida útil estimada (VUE) com base em modelos de previsão de vida útil. Deste modo, conhecendo-se a VUE de cada sistema estrutural, buscou-se diferentes estratégias para garantir VUP de 50 anos como um equivalente funcional entre os projetos.

Vale ressaltar que as tipologias residencial e comercial (no caso, escritórios e hotéis), no que se refere ao sistema estrutural, possuem os mesmos requisitos técnico-funcionais, e a verificação da premissa de que não há variação significativa entre os sistemas estrutural nas duas tipologias é um dos objetivos específicos deste trabalho.

#### **5.4.2.2 Quantitativos de material (fluxos de referência para ACV) e softwares de apoio utilizados no cálculo dos indicadores**

O quantitativo dos materiais empregados no sistema estrutural e os dados geométricos necessários ao cálculo dos indicadores técnico-funcionais foram obtidos das pranchas de projeto estrutural fornecidas pelos escritórios de projeto e/ou empresas construtoras locais. Os custos iniciais de construção e os custos previstos para atividades de recuperação estrutural, ambos incluindo a mão-de-obra correspondente, foram calculados com base nas tabelas de custos referenciais (fevereiro/2013) do LABOR – Laboratório de custos e orçamentos de construção da Universidade Federal do Espírito Santo, disponíveis em (<http://siteiopes.no-ip.info/>).

**A Tabela 5.1 e a Tabela 5.2 mostram, respectivamente, os dados dos sistemas estruturais, referentes ao pavimento-tipo e à superestrutura, utilizados no cálculo dos indicadores ambientais e econômico. A**

Tabela 5.3 mostra os parâmetros utilizados no cálculo dos indicadores técnico-funcionais dos estudos de caso.

A plataforma de apoio à ACV, SimaPro 7.3, foi utilizada para cálculo dos indicadores ambientais. A vida útil dos sistemas estruturais (VUE) foi estimada com o emprego do *software Life-365 v.2.1.1* (EHLEN, 2012). Os cálculos do CCV foram realizados com o apoio do mesmo *software*, com adaptações para também atender às diretrizes da ISO 15686-5: 2008.

---

<sup>2</sup> Na inexistência de regulamentação de desempenho para a tipologia comercial, este estudo considerou VUP equivalente à recomendada na ABNT NBR 15575 para as edificações residenciais.

**Tabela 5.1 - Quantitativos de material (fluxo de referência – FR) e área estrutural dos pavimentos-tipo dos estudos de caso**

Edificação	Volume de concreto [m <sup>3</sup> ]	Área de fôrmas do pavimento-tipo [m <sup>2</sup> ]	Área de fôrmas / R* [m <sup>2</sup> ]	Aço de armadura passiva [kg]	Aço de armadura ativa [kg]	Nº de ancoragens (unidade = placa+cunha) [0,5kg/unid.]	Área estrutural [m <sup>2</sup> ]
FR Ed A	121,10	790,00	197,50	10657,00	0,00	0	784,83
FR Ed B	80,90	463,00	92,60	2927,00	1566,00	112	458,40
FR Ed C	131,90	743,00	185,75	4465,00	2100,00	136	773,20
FR Ed D	164,36	1076,01	215,20	13346,00	2987,00	188	751,00
FR Ed E	99,3	625,00	125,00	6726,00	1711,00	154	414,50
FR Ed F	146,19	891,26	178,25	10447,00	1897,00	99	626,35
FR Ed G	39,07	443,07	110,77	3801,40	0,00	0	247,17
FR Ed H	86	903,00	225,75	8153,00	0,00	0	552,70
FR Ed I	51,36	539,00	107,80	4952,56	0,00	0	249,02
FR Ed J	169,15	1046,00	209,20	6772,00	2567,00	194	662,60
FR Ed K	135,73	325,60	65,12	15338,00	0,00	0	631,50
FR Ed L	106,01	743,77	148,75	10975,00	0,00	0	445,69
FR Ed M	42,15	323,05	64,61	4249,11	572,00	55	171,00
FR Ed N	98,60	698,55	139,71	8442,89	1729,00	111	401,95
FR Ed O	87,40	258,00	51,60	13162,12	0,00	0	411,30
FR Ed P	189,00	736,90	147,38	18395,67	3445,00	211	643,23
FR Ed Q	63,71	635,69	127,14	8141,20	0,00	0	356,78
FR Ed R	77,08	500,00	100,00	5958,82	1550,00	102	331,43
FR Ed S	105,25	762,22	152,44	10798,17	1293,00	128	476,11
FR Ed T	62,30	627,60	125,52	5590,60	0,00	0	344,13
FR Ed U	86,17	564,19	112,84	6259,20	1727,00	130	417,00
FR Ed V	82,00	193,30	38,66	9070,00	0,00	0	374,00
FR Ed X	80,81	552,95	110,59	5678,00	1469,00	114	371,57
FR Ed Z	48,81	465,74	93,15	2348,00	0,00	0	279,09
FR Ed AA	241,95	1577,50	315,50	7653,00	3981,00	275	1079,38
FR Ed AB	251,40	1758,80	351,76	16052,00	4266,00	246	1222,00
FR Ed AC	297,20	1910,00	382,00	21771,95	5072,00	293	1388,80
FR Ed AD	68,00	493,00	98,60	2504,00	955,00	87	287,09
FR Ed AE	168,50	1257,00	251,40	11888,30	2280,00	134	861,50
FR Ed AF	81,60	566,00	113,20	5347,30	1501,00	130	358,23
FR Ed AG	155,60	876,00	219,00	7808,30	3498,00	162	778,10

\* R = nº de reaproveitamentos. Máximo reaproveitamento de fôrmas do pavimento-tipo igual a cinco.

**Tabela 5.2 - Quantitativos de material (fluxo de referência – FR) e área estrutural da Superestrutura dos estudos de caso**

Edificação	Volume de concreto total [m <sup>3</sup> ]	Área de fôrmas total <sup>a</sup> [m <sup>2</sup> ]	Nº de pavimentos <sup>b</sup>	Nº de pavimentos -tipo exceto o 1º pavimento	Aço de armadura passiva [kg]	Aço de armadura ativa [kg]	Nº de ancoragens unidade = placa+cunha [0,5kg/unid.]	Área estrutural total [m <sup>2</sup> ]
FR Ed A	841,50	4464,00	6	4	78939	0	0	5470,00
FR Ed B	1693,00	5205,40	15	12	105444	29023	1792	7105,00
FR Ed C	954,30	4449,00	6	4	40214	14597	816	4640,00
FR Ed D	4520,69	13876,01	23	17	350897	76580	4496	19874,70
FR Ed E	2029,14	6448,10	18	13	133230	32819	2756	8510,00
FR Ed F	3841,92	13222,36	18	14	239501	56978	2438	20406,70
FR Ed G	464,43	3512,88	7	4	37882	0	0	2444,70
FR Ed H	724,90	7090,50	7	4	67506	0	0	4332,40
FR Ed I	944,93	5221,50	16	11	96241	0	0	4180,65
FR Ed J	4608,28	15514,62	23	17	364255	71026	4632	18234,00
FR Ed k	3068,86	7804,20	23	14	342940	0	0	14413,00
FR Ed L	810,93	2832,21	7	5	88972	0	0	3196,43
FR Ed M	902,71	2951,76	19	15	91312	9646	934	3591,00
FR Ed N	2175,39	7483,13	19	13	193006	41962	2603	8730,08
FR Ed O	1696,92	3584,80	17	11	241208	0	0	8296,63
FR Ed P	5552,50	16584,70	24	18	493719	93030	5056	23742,51
FR Ed Q	752,61	4110,80	10	8	94206	0	0	3638,89
FR Ed R	1897,44	8134,17	17	9	152280	36974	1999	7986,08
FR Ed S	3940,26	12590,75	30	23	361971	52849	4316	17382,73
FR Ed T	1080,50	5008,20	12	9	79525	0	0	4777,92
FR Ed U	1217,20	3823,91	12	9	87325	24478	1766	5817,00
FR Ed V	1594,80	2993,20	16	11	168916	0	0	7241,00
FR Ed X	2073,32	9060,05	18	11	129626	35034	2088	9517,40
FR Ed Z	614,76	3924,74	11	6	53708	0	0	3388,29
FR Ed AA	3468,82	13966,06	15	9	259594	52326	3677	17610,66
FR Ed AB	3875,20	22889,60	18	14	314337	70690	3910	21203,50
FR Ed AC	4620,26	25393,00	21	13	524647	140332	6889	34848,40
FR Ed AD	1643,50	7367,00	20	12	106030	22806	1818	7127,67
FR Ed AE	5251,00	21704,00	21	5/6/4	304395	71127	3417	25344,06
FR Ed AF	1920,10	7290,00	20	13	126885	33103	2631	9024,47
FR Ed AG	1314,60	4872,00	9	4	70926	29542	1398	6397,41

<sup>a</sup> exceto casa de máquinas e caixa d'água.

<sup>b</sup> considerando o máximo reaproveitamento de fôrmas do pavimento-tipo igual a 5 (cinco).

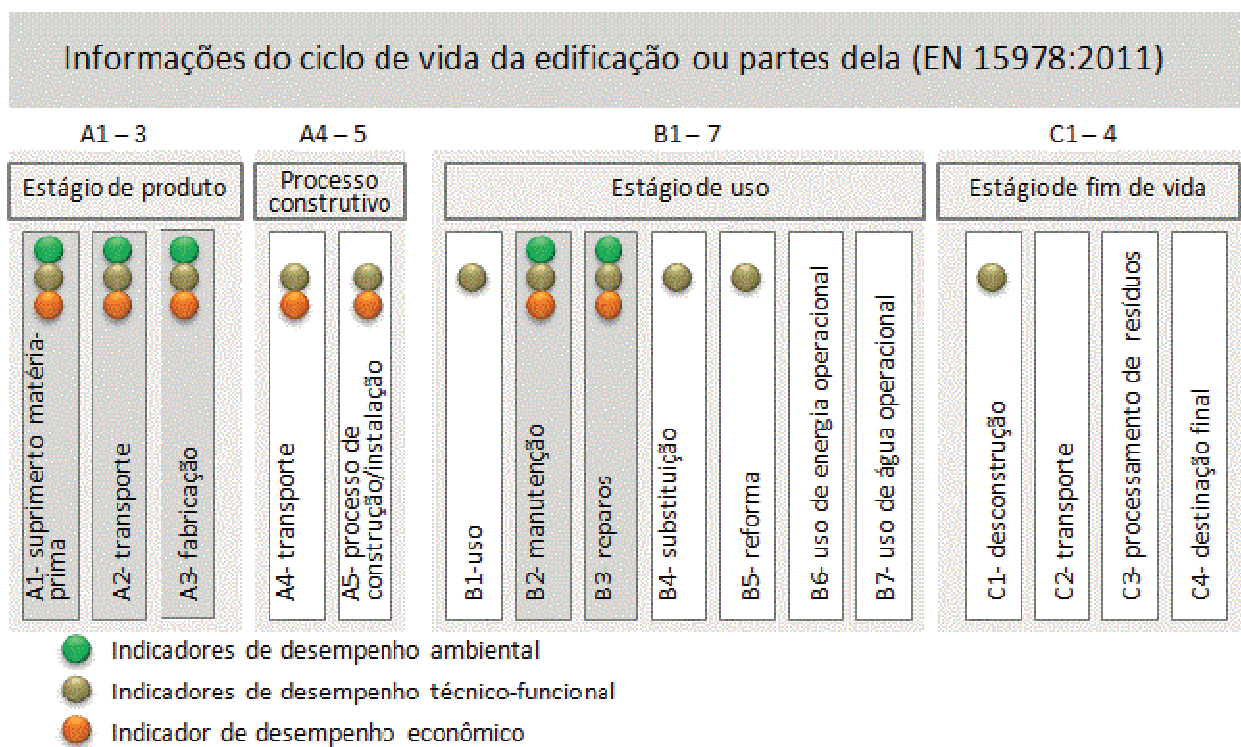
**Tabela 5.3 - Parâmetros de projeto utilizados para cálculo dos indicadores técnico-funcionais**

Edificação	Nº de pilares do pavimento-tipo	Vão médio entre pilares do pavto-tipo [m]	Altura $h_v$ de vigas do pavto-tipo [m]	Altura $h_t$ de lajes do pavto-tipo [m]	$h_{\text{mesa}} / h_{\text{nervura}}$ de lajes nervuradas [m] / [m]	Área estrutural [m <sup>2</sup> ]
Ed A	44	6,80	27,50	27,50	5/22,5	784,83
Ed B	15	7,30	18,00	18,00	-	458,40
Ed C	39	6,00	18,00	18,00	-	773,20
Ed D	22	8,30	18,00	18,00	-	751,00
Ed E	22	5,80	20,00	20,00	-	414,50
Ed F	20	6,80	18,00	18,00	-	626,35
Ed G	22	6,20	70,00	12,00	-	247,17
Ed H	32	5,70	50,00	12,00	-	552,70
Ed I	16	6,40	60,00	12,00	-	249,02
Ed J	25	6,50	20,00	20,00	-	662,60
Ed K	19	6,00	26,00	26,00	5/21	631,50
Ed L	21	6,80	60,00	30,00	7,5/22,5	445,69
Ed M	13	5,45	18,00	18,00	-	171,00
Ed N	18	6,85	18,00	18,00	-	401,95
Ed O	20	6,70	25,00	25,00	7/18	411,30
Ed P	26	7,63	23,00	23,00	5/18	643,23
Ed Q	20	7,20	60,00	13,00	-	356,78
Ed R	15	6,50	20,00	20,00	-	331,43
Ed S	18	5,85	18,00	18,00	-	476,11
Ed T	18	5,80	60,00	12,00	-	344,13
Ed U	14	6,00	18,00	18,00	-	417,00
Ed V	17	7,20	26,00	26,00	8/18	374,00
Ed X	16	7,60	18,00	18,00	-	371,57
Ed Z	20	5,10	60,00	14,00	-	279,09
Ed AA	42	7,00	18,00	18,00	-	1079,38
Ed AB	68	5,50	18,00	18,00	-	1222,00
Ed AC	46	8,20	18,00	18,00	-	1388,80
Ed AD	13	5,60	18,00	18,00	-	287,09
Ed AE	22	8,60	28,00	28,00	5,5/22,5	861,50
Ed AF	16	6,00	18,00	18,00	-	358,23
Ed AG	28	6,80	20,00	20,00	-	778,10

### 5.4.2.3 Limites do sistema estabelecidos para cálculo dos indicadores

(i) Limites referentes aos estágios do ciclo de vida do sistema estrutural

O desempenho do sistema estrutural deve ser descrito ao longo de todo o seu ciclo de vida, o qual pode ser dividido em três fases. A fase I (A1-5) – estágio pré-uso - considera aspectos e impactos relacionados à extração de matéria-prima, à produção dos materiais e à construção do sistema estrutural. A fase II (B1-7) – estágio de uso – inclui aspectos e impactos advindos da manutenção e reparos da estrutura. O estágio de uso corresponde ao período da vida útil de projeto (VUP) (BS ISO 15686-1:2008; ACI 365. 2R-00). A fase III (C1-4) – estágio pós-uso ou estágio de fim de vida – envolve a destinação final do material desmontado ou demolido (CROWHURST et al., 2010; HANS et al., 2012; FESANGHARY et al., 2012). A Figura 5.3 mostra a distribuição do quadro (*framework*) de indicadores proposto nesta tese (Capítulo 6 de resultados), ao longo do ciclo de vida da edificação.



**Figura 5.3 - Aplicação dos indicadores de desempenho de sistema estruturais estudados, sobre a estrutura de informações do ciclo de vida da edificação e suas partes, proposta na norma europeia EN 15978:2011**

(ii) Limites referentes à aplicação dos indicadores técnico-funcionais

Dentre o conjunto de indicadores técnico-funcionais, os indicadores *Espessura equivalente* e *Consumo de aço* calculados com dados de projeto, se aplicam aos estágios de pré-uso e início do

estágio de uso; o indicador *Relação h/l* se aplica aos estágios de pré-uso e uso do ciclo de vida, enquanto que os indicadores *Potencial de reuso*, *Relação hv/hl* e *Densidade de pilares*, associados ao requisito de construtibilidade, atendem também ao requisito de adaptabilidade ao uso, e portanto, se aplicam às fases I, II (B1 a B5) e III (C1) do ciclo de vida (Figura 5.3).

(iii) Limites do sistema e considerações para a técnica de ACCV

Análises econômicas também podem ser realizadas em estágios iniciais do projeto, se houver informações disponíveis sobre dados de referência de custos do ciclo de vida relacionados à edificação.

Economias no ciclo de vida da edificação podem ser resultantes da definição de custos iniciais e de manutenção da própria estrutura, ou obtidas com a otimização de outros sistemas construtivos da edificação. Nivelar as alturas de vigas e lajes, ou adotar lajes lisas (sem vigas), por exemplo, são medidas que trazem economia de consumo de recursos materiais e de energia, devido à otimização do pé direito, reduzindo alvenarias, revestimentos, aquecimento e refrigeração, além de aumentar a adaptabilidade. A otimização do número de pilares, por sua vez, proporciona melhores ou até maior número de vagas. Quantificar estes efeitos e sinergias no custo do ciclo de vida é tarefa complexa que requer uma quantidade de dados detalhados, normalmente, não disponíveis para consulta.

As ACCV realizadas nesta tese utilizaram a abordagem dada pelo *software Life-365 v.2.1.1* (EHLLEN, 2012), desenvolvido com base em um quadro (*framework*) geralmente aceito para estimativas de custo do ciclo de vida, e com base em modelos de previsão de vida útil. Desta forma, o CCV abrangeu os estágios pré-uso e uso e não considerou o estágio de fim de vida (Figura 5.3). Esta decisão está amparada pela ISO 15686-5:2008.

(iv) Limites do sistema para a ACV ambiental e fontes dos dados de inventário

O cálculo dos indicadores de desempenho ambiental foi realizado com o apoio do software *SimaPro 7.3*. As ACV seguiram as diretrizes metodológicas da ISO 14040:2006. Os limites de sistema definidos caracterizam uma *avaliação do berço ao portão da fábrica (cradle to gate LCA)*, que desconsidera o transporte, a construção e os estágios de uso e pós-uso (fim de vida). Os indicadores de desempenho ambiental consideraram também os estágios B2-3 da fase de uso.

Dados para a modelagem do ciclo produtivo foram extraídos da literatura nacional ou adaptados de processos existentes nas bases de dados internacionais *Ecoinvent v.2.2* ou *ELCD v.2.0* com a

consideração da matriz energética brasileira, uma vez que estes processos são considerados similares aos realizados no Brasil. Os dados referentes aos aços de protensão foram obtidos da base de dados *WorldSteel* que não admite edição. O Quadro 5.10 mostra as unidades funcionais adotadas e as fontes dos dados usados para modelagem dos processos de produção dos materiais.

Na modelagem do ciclo produtivo do cimento CPIII-32 nenhum critério para alocação de impactos entre o aço e a escória granulada de alto forno foi adotado. Apesar dela ser entendida como coproduto da produção do aço, na prática atual de mercado não é feita nenhuma alocação de impacto para ela. Alocação é uma questão metodológica reconhecidamente desafiadora na técnica de ACV, devido aos seus potenciais impactos nos resultados, e embora prevista na norma ISO 14040:2006, sua consideração não é imperativa para os objetivos desta tese, além de fugir ao seu escopo.

**Quadro 5.10 – Notação original dos materiais nas bases, unidades e fontes dos dados de inventário utilizados para modelar as ACV dos materiais das estruturas estudadas**

Materiais de construção empregados na estrutura Notação original		Unidade	Fonte dos dados
<i>Sand, at mine; Gravel, crushed, at mine; Tap water, at user<sup>b</sup></i>	<i>Concreto (fck 25, 30 e 35MPa)<sup>a</sup></i>	1 m <sup>3</sup>	Silva, 2006
<i>Plywood, outdoor use, at plant (BR);</i>	<i>Madeira compensada para fôrmas; Areia; Brita</i>	1 m <sup>3</sup>	Ecoinvent v.2.2 (disponível em: <http://www.pre.nl.>.)
<i>Steel rebar, blast furnace and electric arc furnace route, production mix, at plant</i>	<i>Aço para concreto armado (CA-50)</i>	1 ton	ELCD v.2.0 ( <i>European life cycle database</i> ) (disponível em: <http://www.pre.nl.>.)
<i>wire rods<sup>c</sup></i>	<i>Aço para concreto protendido (CP-190)</i>	1 ton	<i>World Steel Association</i> (FINKBEINER et al., 2011)
<i>Cast iron, at plant / RER U - BR</i>	<i>Ferro fundido para placas de ancoragem para protensão</i>	1 ton	Ecoinvent v.2.2 (disponível em: <http://www.pre.nl.>.)

<sup>a</sup> concreto dosado com cimento tipo CPIII-32 (66% de escória de alto forno em substituição ao clínquer no cimento)

<sup>b</sup> o processo de produção do concreto foi modelado utilizando estas entradas presentes na base Ecoinvent v.2.2. O cimento foi modelado utilizando as matérias primas “calcium sulfate, in ground”, e, para fabricação do clínquer, “marl, in ground”, “Clay, unspecified, in ground”, “pyrite, in ground”, “slate, in ground”, e a matriz energética brasileira presente na base Ecoinvent v.2.; utilizando valores de composição documentados por Silva (2006).

<sup>c</sup> por não ter sido encontrado nas bases de dados do software SimaPro 7.3, os dados para modelagem do ciclo produtivo do aço para concreto protendido foram obtidos por meio da World Steel Association..

Diante da inexistência dos dados originais das dosagens dos concretos utilizados nas edificações, os cálculos desta tese são com base em dosagens experimentais publicadas por pesquisa anterior para a região de Vitória, ES, onde o cimento Portland CP III-32 é comercialmente dominante (SILVA et al., 2006).



Vale ressaltar que, apesar da ABNT NBR 5735:1991 permitir a incorporação de até 70% em massa de escória granulada de alto forno no cimento Portland CP III-32, é prática usual do mercado utilizar teor máximo de aproximadamente 58%, considerado como o limiar de viabilidade econômica para a moagem conjunta de clínquer e escória granulada de alto-forno. A incorporação de 66% de escória granulada de alto-forno considerada nesta pesquisa configura uma situação específica, obtida pela moagem separada da escória granulada de alto-forno e do clínquer. A Tabela 5.4 mostra as dosagens desenhadas para os concretos com cimento CP III-32 para as resistências características à compressão correspondentes àquelas adotadas nos estudos de caso.

**Tabela 5.4 - Resistências características à compressão (fck), traços unitários em massa e consistência (abatimento do tronco de cone) do concreto com cimento CP III-32, adotados a partir de resultados de pesquisa na região dos estudos de caso (SILVA et al., 2006)**

	Fck (MPa)	Traços em massa (material cimentício: areia: brita: água)	Consistência (abatimento do tronco de cone)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> de concreto)
<b>Concreto com cimento CP III-32</b>	25	1: 2,78: 3,02: 0,6	70 ± 10 mm	300
	30	1: 2,5: 2,3: 0,5	70 ± 10 mm	380
	35	1: 2,44: 2,25: 0,5	70 ± 10 mm	390

#### 5.4.2.4 Modelo para previsão de vida útil utilizado

Vida útil (VU) é definida como o período de tempo após a construção, durante o qual uma edificação ou partes dela atende ou excede os requisitos técnicos e funcionais (BS EN 15643-2: 2011). A Vida útil pode ser determinada por meio de modelos de previsão para um elemento particular em um ambiente determinado. Para corrosão induzida por cloretos em ambiente marinho, muitos destes modelos adotam o desenvolvimento em dois estágios, largamente conhecido, proposto primeiramente por Tuutti (1982), no qual a deterioração é dividida nos períodos de iniciação e de propagação. Este é o caso do software *Life-365 v.2.1.1* (EHLEN, 2012), utilizado nesta tese.

O período de iniciação,  $t_i$ , representa o tempo necessário para que cloretos, em sua concentração limite,  $C_t$ , atinjam a espessura do revestimento,  $c_{min}$ . A duração deste período é uma função da qualidade e espessura do revestimento de concreto, das condições de exposição (o teor de cloretos na superfície e a temperatura ambiente) e da concentração limite de cloretos,  $C_t$ , necessária para

iniciar a corrosão. Assume-se que nenhum dano (devido a cloretos ou corrosão) ocorra durante este período (EHLEN, 2012).

*Life-365 v.2.1.1* adota uma abordagem simplificada para prever o período de iniciação, supondo que o concreto esteja completamente saturado e que a difusão iônica seja o único mecanismo de transporte de cloretos para resolver a Segunda Lei de Fick, dada pela Equação 5.1:

$$\frac{dC}{dt} = D \cdot \frac{d^2C}{dx^2} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde,  $C$  = teor de cloretos,

$D$  = coeficiente de difusão aparente,

$x$  = profundidade a partir da superfície externa, e

$t$  = tempo.

O coeficiente de difusão é função do tempo e da temperatura, e o *Life-365* usa a Equação 5.2 para expressar mudanças na difusão no tempo:

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad \text{Equação 5.2}$$

onde,  $D(t)$  = coeficiente de difusão no tempo  $t$

$D_{ref}$  = coeficiente de difusão no tempo  $t_{ref}$  (igual a 28 dias no *Life-365*); e

$m$  = índice de declínio da difusão, uma constante que depende da mistura.

O *Life-365* seleciona  $D_{ref}$  e  $m$  com base na relação água-materiais cimentícios, tipo e proporção destes últimos. O software assume que a Equação 5.2 é válida para período máximo de 25 anos, assumindo que a hidratação esteja completa neste período, além do qual  $D(t)$  permanece constante, com o valor  $D$  (25 anos).

E o valor de  $m$  diminui o coeficiente de difusão ao longo de 25 anos e é dado pela Equação 5.3. O software admite até 70% de adição de escória granulada de alto forno e até o máximo de 50 % de cinza volante.

$$0,2 \leq m = 0,2 + 0,4 \cdot \left(\frac{V_e}{70} + \frac{V_{cv}}{50}\right) \leq 0,6 \quad \text{Equação 5.3}$$

onde,  $V_e = \text{teor de escória granulada de alto forno em \%}$ .

$V_{cv} = \text{teor de cinza volante em \%}$ .

Além disso, o Life-365 utiliza a Equação 5.4 para mudanças na difusão em função da temperatura:

$$D(T) = D_{ref} \cdot \exp\left(\frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad \text{Equação 5.4}$$

onde,  $D(T) = \text{coeficiente de difusão no tempo } t \text{ e temperatura } T$ ,

$D_{ref} = \text{coeficiente de difusão no tempo } t_{ref} \text{ e temperatura } T_{ref}$ ,

$U = \text{energia de ativação do processo de difusão (35000 J/mol)}$ ,

$R = \text{constante do gas, e}$

$T = \text{temperatura absoluta}$ .

A solução para o período de iniciação da corrosão é obtida por meio do método de diferenças finitas para a solução da Equação 5.1, onde o valor de D é modificado a cada incremento de tempo usando a Equação 5.2 e Equação 5.4. As seguintes premissas são implícitas no modelo: o material é homogêneo; a concentração superficial de cloretos em torno do elemento de concreto é constante, para um determinado ponto no tempo; as propriedades dos elementos são constantes durante cada incremento de tempo, calculadas no início de cada incremento de tempo; e a constante de difusão é uniforme ao longo da profundidade do elemento (EHLEN, 2012).

O período de propagação, por sua vez, depende da taxa do processo de corrosão e da definição de dano inaceitável. Este nível de dano irá variar em função dos requisitos do cliente e da natureza do sistema estrutural. A taxa de corrosão será influenciada por um grande número de fatores, dentre eles, a natureza da armadura, as propriedades do concreto que a envolve, a composição da solução nos poros do concreto e as condições ambientais (particularmente, temperatura e umidade). Modelos têm sido desenvolvidos para prever a taxa de corrosão e acumulação de danos (SAETTA et al., 1993), mas poucos foram validados ou calibrados com dados de campo.

Em virtude da complexidade do processo de corrosão, uma estratégia comum tem sido a definição de valores fixos para o período de propagação com base em observações empíricas, como a adotada no Life-365 v.2.1.1. Apesar do período de propagação,  $tp$ , ser fixado em 6 anos, com base em estudos de Weyers e outros (1993), ou em 20 anos (WEYERS et al., 1998) se for

usado aço com pintura epóxi, ele pode ser modificado para refletir a experiência local (EHLEN, 2012) e redefinir o *tempo para o primeiro reparo* ( $tr$ ), o qual marca o fim da vida útil estimada (VUe), de acordo com o modelo adotado de previsão de vida útil por ataque de cloretos.

Neste trabalho, o *tempo para o primeiro reparo* ( $tr$ ) deflagra o início do programa de manutenção definido para permitir que todos os estudos de caso alcancem a vida útil de projeto, VUP de 50 anos, mínima requerida pela ABNT NBR 15575:2013 e garantir equivalência funcional para ambos os cálculos de ACV e CCV. O intervalo de 10 anos entre reparos (*default do software*) foi adotado por representar razoavelmente a prática corrente.

#### **5.4.2.5 Entrada de dados no software *Life-365 v.2.1.1* para estimar a vida útil**

Os parâmetros de entrada usados no *Life-365 v.2.1.1* para previsão da vida útil, VUe, considerada no modelo como o *tempo para o primeiro reparo* (período de iniciação somado ao de propagação) são: tipo e características geométricas do elemento estrutural, o local (isto é, condições ambientais como a temperatura), o ambiente de exposição (distância de 800m do mar, zona de respingo de maré, etc.), o tempo de exposição (Equação 5.2), detalhes de cada cenário de estratégia de proteção, tais como, relação água-materiais cimentícios, tipo e quantidade de adições minerais e inibidores de corrosão, tipo de armadura, tipo e propriedade de membranas ou seladores (EHLEN, 2012).

A partir destes dados de entrada, o software prevê o coeficiente de difusão aparente e a vida útil da estrutura. Havendo medidas do coeficiente de difusão, estas podem ser usadas. A concentração superficial de cloretos pode ser um outro parâmetro de entrada, porém usou-se o valor predeterminado pelo programa.

O modelo permite o uso de relação água/materiais cimentícios igual ou menor que 0,60, teor de escória de alto-forno até 70% e teor de cinza volante até 50 %. O modelo considera que até os 28 dias, assim como, após 25 anos, a escória de alto-forno não contribui para a diminuição do coeficiente de difusão.

Foram utilizados os perfis de temperaturas médias mensais das regiões dos estudos de caso, obtidos a partir de arquivos climáticos das estações meteorológicas do aeroporto de Vitória, ES, e da Barra da Tijuca, RJ, e como todas as edificações estudadas situam-se na orla do mar, o ambiente de exposição adotado foi a distância de 800m do mar.

#### 5.4.2.6 Cálculo dos indicadores de desempenho ambiental

Os inventários de ciclo de vida das ACV fornecem dados referentes aos recursos consumidos e as emissões e resíduos produzidos ao longo de todas as fases avaliadas do ciclo de vida dos materiais, dando o suporte necessário ao cálculo dos indicadores ambientais por unidade funcional (uf) definida para cada material utilizado no sistema estrutural.

O cálculo da energia incorporada ( $EE_{ren}$ ,  $EE_{nren}$  – MJ/uf) soma as quantidades listadas de energia primária, discriminando as parcelas de energia renovável e não renovável consumidas desde a extração da matéria-prima até a produção de cada material considerado. O cálculo da pegada de água azul (bWF –  $m^3$ /uf) totaliza a água – obtida de fontes superficiais e subterrâneas – consumida durante a extração e produção (HOEKSTRA et al., 2012). O conteúdo abiótico ou conteúdo não renovável (NRC – kg/uf), por sua vez, é calculado pela soma de todos os recursos minerais não renováveis consumidos, enquanto que o consumo de recursos materiais ( $Mc$  – kg/uf) é dado em termos da massa total de aços, concreto e fôrmas de madeira compensada, por unidade funcional.

Ademais, esta tese também propõe para avaliação do desempenho ambiental do sistema estrutural, ainda de acordo com a EN 15643-2:2011 e a EN 15804:2012, outros indicadores associados a determinadas categorias de impacto das ACV, os quais são extraídos da etapa de avaliação de impactos (caracterização) da ACV. São eles: carbono equivalente incorporado ( $ECO_{2e}$  –  $kgCO_{2e}$ /uf), potencial de acidificação (AP –  $kgSO_{2eq}$ /uf), potencial de eutrofização (EP –  $kg(PO_4)_{3-eq}$ /uf), potencial de depleção da camada de ozônio (ODP –  $kgCFC_{11-eq}$ /uf) e por fim, potencial de formação de ozônio fotoquímico (POCP –  $kgC_2H_{4-eq}$ /uf).

Os indicadores ambientais propostos se aplicam às fases I (A1-3) e II (B2, B3) do ciclo de vida do sistema estrutural que compreendem os estágios de pré-uso e uso (Figura 5.3), desconsiderando aspectos e impactos ambientais relativos ao transporte da fábrica ao canteiro e equipamentos usados na construção. A fase III não foi considerada devido à falta de dados ambientais confiáveis referentes às alternativas de fim de vida no contexto brasileiro.

O estágio de uso corresponde ao período da vida útil de projeto (VUP). Com base na VUe obtida no software *Life-365 v.2.1.1*, um programa de reparos para assegurar a VUP de 50 anos foi estabelecido. Para cada evento de reparo previsto foi assumido um consumo de material equivalente a 10% do valor quantificado no projeto estrutural, tanto no nível de um pavimento-tipo, quanto no da superestrutura. Estes valores foram somados ao consumo total de materiais

extraído do projeto estrutural, assegurando que os indicadores ambientais contemplem as fases I e II do ciclo de vida da estrutura (Figura 5.3). As fundações foram desprezadas para isolar os efeitos da capacidade de carga do solo no dimensionamento estrutural e, conseqüentemente, no consumo de materiais e impactos correspondentes.

Os valores dos indicadores por unidade funcional foram, então, multiplicados pelo consumo de cada material correspondente a um pavimento-tipo e à superestrutura, incluindo o consumo assumido para os eventos de reparos previstos, e foram normalizados pelas respectivas áreas estruturais ( $m^2_{AE \text{ pavto-tipo}}$ ,  $m^2_{AE \text{ superestrutura}}$ ). Desta forma, os indicadores ambientais foram calculados para um pavimento-tipo e para a superestrutura completa de cada estudo de caso.

#### 5.4.2.6.1 Normalização dos perfis ambientais e sistema de ponderação adotado para os indicadores de desempenho ambiental

A normalização é um elemento opcional da avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV). Segundo a ISO14040:2006, a normalização é o cálculo da magnitude dos resultados de um indicador de determinada categoria, em relação a dados de referência. Esses dados podem ser relacionados a uma dada comunidade, pessoa ou outro sistema, durante um dado período de tempo. Metas futuras também podem ser usadas como referência.

O principal objetivo em se normalizar os resultados do indicador de uma categoria de impacto é melhorar a compreensão da importância relativa e magnitude destes valores para o sistema estudado. A normalização pode ser usada para verificar inconsistências, para fornecer e comunicar informações sobre a importância relativa dos resultados da categoria de indicadores e preparar-se para procedimentos adicionais, tais como ponderação e interpretação (BUDAVARI et al., 2011; GOEDKOOOP et al., 2010a).

Valores normalizados podem ser calculados dividindo-se os resultados dos indicadores extraídos da caracterização, por fatores de normalização associados à informação de referência, os quais variam muito entre os diferentes métodos de avaliação existentes (BUDAVARI et al., 2011).

A ponderação, por sua vez, também é uma etapa opcional na avaliação de impactos da ACV. Consiste na atribuição de fatores numéricos aos resultados (normalizados) dos indicadores para cada categoria de impacto avaliada, de acordo com sua importância relativa. Estes fatores são multiplicados pelos indicadores que podem, então, ser agregados (BUDAVARI et al., 2011; GOEDKOOOP et al., 2010a).

Entre os resultados do projeto LoReLCA, por exemplo, destaca-se a importância de harmonização dos métodos de normalização, antes mesmo da recomendada investigação quanto a possibilidade de desenvolver métodos comuns para definição de sistemas de ponderação, uma vez que somente dados normalizados podem ser ponderados. E recomendam que questões relativas a aspectos de ponderação específicos para edificações deveriam ser abordadas, por exemplo, vida útil longa, ou relação de sistemas locais e globais, devido a diferentes locais de fábricas e locais de construção. Em resumo, o desenvolvimento de um sistema de ponderação comum pode ser útil, mas deve ficar como um elemento opcional voluntário (BUDAVARI et al., 2011).

Pelo exposto, os resultados dos indicadores ambientais de todos os sistemas estruturais em estudo serão normalizados em relação aos resultados de um deles, devido a inexistência de dados de referência publicados na literatura nacional, específicos para edificações brasileiras ou partes dela.

Os resultados são analisados num primeiro momento, isoladamente, sem normalização ou ponderação. Em seguida, após serem normalizados eles são ponderados em dois cenários: *cenário A1* - adaptação da metodologia proposta pelo *Eco-indicator 99*. Diante da dificuldade encontrada para formar um painel de especialistas capaz de definir a ponderação entre os indicadores ambientais, foi adaptada a ponderação hierárquica do sistema de avaliação de impactos *Eco-indicator 99*, que considera a ponderação distribuída em três categorias de danos, quais sejam, danos à saúde humana, à qualidade dos ecossistemas e aos recursos; e *cenário A2* - com peso unitário para todos os indicadores ambientais. O método *Eco-indicator 99* oferece três diferentes versões metodológicas para lidar com escolhas subjetivas, usando os arquétipos especificados na Teoria da Cultura<sup>3</sup>: as versões igualitária, individualista e a hierárquica.

Em uma caracterização simplificada das três perspectivas, descreve-se a igualitária como de longo prazo, onde a mínima evidência científica justifica a inclusão de substâncias cujos efeitos ambientais são considerados; a individualista, como de curto prazo, em que somente efeitos de substâncias comprovadamente nocivas são incluídos; e a hierárquica, como de médio prazo, no qual o consenso entre cientistas determina a inclusão das substâncias (BUDAVARI et al., 2011). A perspectiva hierárquica adotada nesta pesquisa, privilegia danos à saúde humana e aos ecossistemas, em relação aos recursos, que apesar de ser o que mais salta aos olhos no caso do

---

<sup>3</sup> A Teoria da Cultura é um ramo da antropologia que busca definir uma concepção heurística da cultura em termos científicos.

concreto, é a parte visível do dano, enquanto as demais são subdivulgadas. Segundo Goedkoop et al (2010a), as escolhas subjetivas da versão hierárquica são, em geral, científica e politicamente aceitas.

Os pesos atribuídos aos indicadores foram adaptados, uma vez que o conjunto proposto nesta tese não contempla todas as categorias de impacto do *Eco-indicator 99*. Os pesos atribuídos às categorias de impacto não contempladas, dentro de cada categoria de dano, foram redistribuídos, mantendo-se a importância relativa entre os indicadores comuns.

**Tabela 5.5 - Cenários de ponderação: cenário A1 - pesos atribuídos aos indicadores de desempenho ambiental (adaptado do sistema de ponderação hierárquica do *Eco-indicator 99*) e cenário A2 – pesos iguais entre todos os indicadores**

<i>Eco-Indicator 99</i>	Cenário A1		Cenário A2
Categorias de impacto e pesos correspondentes	Categorias de danos (versão hierárquica) peso (%)	Indicadores ambientais	Peso (fator de ponderação)
Carcinogênicos, 5,2%	Danos à saúde humana (40%)	(POCP) [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq/uf]	1,14
Respiráveis Inorgânicos, 27,8%		(EGWP) [kgCO <sub>2</sub> -eq/uf]	35,43
Respiráveis orgânicos, 0,2%		(ODP) [kg CFC <sub>11</sub> -eq /uf]	3,43
Aquecimento global, 6,2%		(AP) [kg SO <sub>2</sub> -eq / uf]	20
Radiação, 0,1%	Danos aos ecossistemas (40%)	(EP) [kg (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> -eq / uf]	20
Depleção ozônio, 0,6%		(bWF) [m <sup>3</sup> / uf]	0,1
Ecotoxicidade, 6,3%	Danos aos recursos (20%)	(NRc) [kg / uf]	0,1
Uso da terra, 30,8%		(Mc) [kg / uf]	0,1
Acidificação / Eutrofização, 2,9%		(EE <sub>ren</sub> ) [MJ / uf]	0,1
Minerais, 0,4%		(EE <sub>n ren</sub> ) [MJ / uf]	19,6
Fósseis, 19,6%		Total:	100

O *Eco-indicator 99* é precursor de métodos, tais como, *Lime*, *Impact 2002*, *ReCiPe* e *CML2002*, cujas ponderações, no entanto, são mais difíceis para se adaptar aos indicadores aqui propostos (BUDAVARI et al., 2011). Por conseguinte, optou-se por um método proposto com base científica em um sistema de avaliação de impactos existente e largamente utilizado, para um dos cenários de ponderação dos indicadores ambientais. O *cenário A2* foi utilizado para análise de sensibilidade da ponderação. A Tabela 5.5 mostra os pesos dos indicadores nos *cenários A1 e A2*,



suas métricas, cujas unidades funcionais (uf) são a área estrutural do pavimento-tipo [ $m^2_{AE}$ ] e da superestrutura [ $m^2_{AE\ tot}$ ], para carregamento residencial e comercial em ambiente marinho, e 50 anos de VUP, e no caso do *cenário A1*, as categorias de danos correspondentes, os indicadores e pesos adaptados, além dos indicadores e pesos originais do *Eco-indicator 99*.

#### 5.4.2.7 Cálculo do indicador de desempenho econômico - CCV

A estimativa do custo do ciclo de vida feita pelo *software Life-365 v.2.1.1* considera apenas os dados referentes ao concreto e ao aço para concreto armado. Em virtude disso, foi necessária uma adaptação na entrada de dados do programa para incluir os custos e mão-de-obra referentes, também, às fôrmas de madeira compensada, aços de protensão e ancoragens.

Para tanto, o custo total das fôrmas com mão-de-obra e impostos (considerando o máximo de 5 reaproveitamentos das fôrmas do pavimento-tipo) foi dividido pelo volume de concreto correspondente e somado ao custo/ $m^3$  do concreto, que por sua vez, incluiu mão-de-obra, impostos, 5% de perdas e 6% de taxa para concreto bombeável. De forma análoga, para o dado de entrada “custo do aço” foi adotada a média ponderada entre o custo/kg de armaduras passivas e ativas com as ancoragens, incluídos os custos da respectiva mão-de-obra e impostos.

O custo de material e mão-de-obra referentes a concreto, fôrmas e escoramento, bem como aços para concreto armado foi calculado a partir de tabelas de custos referenciais (fevereiro/2013) do LABOR – Laboratório de orçamentos e custos de construção da Universidade Federal do Espírito Santo ([http://siteiopes.no-ip.info/.](http://siteiopes.no-ip.info/)), enquanto que o custo de material e mão-de-obra referentes aos aços de protensão e ancoragens foi fornecido pela empresa capixaba PTE – Pós-tensão Engenharia Ltda<sup>4</sup>.

Analogamente ao anteriormente descrito para os indicadores ambientais, o cálculo do custo do ciclo de vida considerou programas de manutenção iniciados no *tempo para o primeiro reparo (tr)*, ou seja, ao final da vida útil estimada (VUe) para cada edificação, com intervalos de 10 anos entre reparos. Os quantitativos de material foram extraídos do projeto estrutural para compor o custo inicial (de construção). Para cada evento de reparo previsto, considerou-se um consumo equivalente a 10% do quantitativo de projeto para computar os custos de materiais e mão-de-obra de recuperação de estruturas de concreto correspondentes.

---

<sup>4</sup> Empresa atuante no mercado do Espírito Santo responsável pelo fornecimento do material, equipamentos e serviços de protensão. Informações fornecidas em abril de 2013 pelo engenheiro responsável, Alexandre Amaral.

Quatro parâmetros econômicos devem ser definidos para o cálculo do CCV no *Life-365 v.2.1.1*: o período de referência, o ano de referência, a taxa de inflação anual e a taxa real de desconto. O CCV é dado pelo somatório dos custos iniciais de construção e os custos descontados dos reparos futuros, incluindo material e mão-de-obra, ao longo da vida útil de projeto de cada sistema de lajes do pavimento-tipo. Devido à falta de registros confiáveis de custos de projeto para a desmontagem e de alternativas de pós-uso, os custos de fim de vida não foram considerados no cálculo do CCV, sendo essa decisão amparada pela ISO 15686-5:2008.

A VUP de 50 anos foi considerada como período de referência do estudo para as projeções dos custos, tomando 2013 como ano de referência. Custos futuros de material e mão-de-obra são calculados com base no valor presente, utilizando a taxa de inflação,  $i$ , e a taxa real de desconto,  $r$ .

O valor presente, VP de um custo futuro  $c$  no ano  $t$  é dado pela Equação 5.5 (EHLEN, 2012):

$$VP = c \cdot \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^t \quad \text{Equação 5.5}$$

Taxas anuais de 6.59% e 7.5% foram adotadas como taxa de inflação e taxa real de desconto, respectivamente, e foram mantidas constantes ao longo do período de referência. Estes valores de abril de 2013 representam, nesta ordem, o índice de preços ao consumidor (IPCA) definido pelo Instituto Brasileiro de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), e a taxa especial de liquidação e custódia (SELIC), estabelecida pelo Comitê Brasileiro de Política Monetária.

#### 5.4.2.8 Cálculo dos indicadores de desempenho técnico-funcional

Os parâmetros necessários (

Tabela 5.3) ao cálculo dos indicadores técnico-funcionais foram extraídos das pranchas de projeto estrutural das edificações dos estudos de caso. Analogamente ao procedimento adotado para os indicadores ambientais, os resultados dos indicadores técnico-funcionais dos sistemas estruturais em estudo serão normalizados em relação aos resultados da edificação EdX.

Analisados num primeiro momento, isoladamente, sem normalização ou ponderação, os resultados serão normalizados e ponderados em dois cenários: *cenário T1*, abordado na etapa seguinte, obtido com aplicação do processo de análise hierárquica a um painel de especialistas, e *cenário T2* - com pesos iguais para todos os indicadores técnico-funcionais. A descrição dos referidos indicadores e suas métricas encontram-se listados no Quadro 5.9.

### 5.4.3 Tratamento estatístico

As amostras foram comparadas aos pares. Inicialmente, comparou-se duas escalas de análise: a escala do pavimento, no caso, o pavimento-tipo; e a escala do sistema estrutural, ou seja, a superestrutura completa. Como ambos estão presentes nas mesmas edificações, optou-se pela utilização do teste estatístico não paramétrico de *Wilcoxon*, por se tratarem de dados pareados (dois dados vindos das mesmas edificações) e estes não apresentarem distribuição conhecida (WILCOXON, 1945; MYLES, DOUGLAS, 1999).

Em seguida, foram comparados os tipos de laje, tanto na escala da superestrutura como na do pavimento-tipo, sendo comparados em dois grupos: concreto armado e concreto protendido. Por se tratarem de edificações diferentes, ou seja, em virtude dos dados serem independentes, o teste não paramétrico *Mann-Whitney U* foi selecionado para as comparações (MANN et al., 1947; MYLES, DOUGLAS, 1999). Em paralelo, foi realizado o teste  $t^5$  a fim de verificar a igualdade nos resultados, caso fosse feita uma abordagem paramétrica.

Para as comparações, foi adotado um nível de significância de 5% para a rejeição da hipótese nula, seguindo a escala de evidências sugerida por FISHER (1954). Assim, quando os valores para o p-valor apresentados nas tabelas forem inferiores a 0,05 tem-se uma evidência moderada de que as duas amostras apresentam diferenças nos parâmetros de dispersão.

Os gráficos criados são do tipo *Box-plot*, onde as “caixas” demonstram a dispersão dos dados das amostras e as linhas superiores e inferiores, os maiores e menores valores encontrados, respectivamente.

#### 5.4.3.1 Teste de Wilcoxon Pareado

O teste de *Wilcoxon Pareado* é um teste estatístico não paramétrico usado (i) para a comparação de dois grupos amostrais relacionados, onde as amostras são pareadas, ou (ii) para medidas repetidas de uma mesma amostra após dado tratamento. É um teste alternativo para o teste *t* para dados pareados e não requer que a população apresente distribuição Normal.

Como pressupostos para o teste estão a necessidade de que os dados sejam pareados e pertencentes à mesma população. Cada par deve ter sido escolhido de forma aleatória e independente e os dados devem ser medidos em uma escala ordinal, mas não precisam apresentar distribuição Normal. O procedimento para sua realização é dado a seguir.

---

<sup>5</sup> O teste *t* é um método estatístico paramétrico e com pressupostos mais rígidos, como de Normalidade dos dados. Foi realizado, em paralelo, apenas para efeito de comparação.

Seja  $N$  o número total de pares na amostra, para  $i = 1, \dots, N$ ,  $x_{1i}$  e  $x_{2i}$  denotam as medidas de cada dado. As hipóteses a serem testadas são:

$H_0$ : a diferença entre as medianas dos pares é zero

$H_1$ : a diferença entre as medianas dos pares é diferente de zero

Então, para  $i = 1, \dots, N$ , calcula-se as diferenças absolutas  $|x_{2i} - x_{1i}|$  e guarda-se o sinal da diferença,  $sgn(x_{2i} - x_{1i})$ . Os pares onde  $|x_{2i} - x_{1i}| = 0$  são excluídos da amostra e  $N_r$  denota o tamanho da amostra após a redução.

Os  $N_r$  pares são, então, ordenados da menor diferença absoluta para a maior, e são atribuídos postos para os pares de acordo com essa ordem, iniciando a contagem em 1, e são denotados então por  $R_1$ . Empates recebem postos iguais à média dos postos dos envolvidos.

A partir disso, a estatística de teste  $W$  é calculada com a Equação 5.6:

$$W = \left| \sum_{i=1}^{N_r} [sgn(x_{2i} - x_{1i})R_i] \right| \quad \text{Equação 5.6}$$

$W$  é o valor absoluto da soma dos postos sinalizados, e seus valores são comparados à valores críticos retirados de uma tabela de referência. A medida que  $N_r$  aumenta, a distribuição amostral de  $W$  converge para a distribuição Normal. Alternativamente, o  $p$ -valor<sup>6</sup> do teste pode ser calculado a partir da enumeração de todas as possíveis combinações de  $W$ , dados os  $N_r$  pares, e a partir de um nível de significância pré-estabelecido rejeita-se ou não a hipótese nula do teste.

#### 5.4.3.2 Teste de Mann-Whitney U

O teste de *Mann-Whitney U*, também conhecido como teste de *Mann-Whitney-Wilcoxon* é um teste estatístico não paramétrico utilizado para verificar se duas amostras pertencem a mesma população, ou seja, são iguais em relação aos parâmetros e sua distribuição. Ele tem eficiência e funcionalidade comparável ao teste  $t$ , mas com o foco em distribuições não pertencentes à distribuição Normal.

Como pressupostos, o teste exige que as observações de ambos grupos amostrais a serem testados sejam independentes e que sejam iguais em distribuição. Os dados devem ser contínuos.

<sup>6</sup> O  $p$ -valor é a probabilidade de ocorrer, na estatística do teste, valores mais extremos do que o ocorrido na amostra, assumindo que a hipótese nula é verdadeira.

O método consiste na ordenação de todas as amostras, atribuindo-se postos a elas, iniciando em 1 para o menor valor e acrescentando uma unidade sucessivamente. Se a soma dos postos dos dois grupos apresentarem uma diferença estatisticamente significativa, é rejeitada a hipótese nula de igualdade de distribuição e parâmetros. Outra forma de se obter o  $U$ , que é a estatística de teste, é dada pela Equação 5.7:

$$U_1 = R_1 - \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} \quad \text{Equação 5.7}$$

Onde  $n_1$  é o tamanho amostral do primeiro grupo e  $R_1$  é a soma dos postos deste. De forma similar, para o segundo grupo se calcula pela Equação 5.8:

$$U_2 = R_2 - \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} \quad \text{Equação 5.8}$$

O menor valor obtido entre  $U_1$  e  $U_2$  será comparado a um valor crítico tabelado, de acordo com o tamanho das amostras. De forma similar ao *teste de Wilcoxon*, a estatística de teste  $U$  também pode ser aproximada à distribuição Normal em casos de grandes amostras, e o *p-valor* pode ser calculado para a tomada de decisão de rejeição ou não rejeição da hipótese nula, dado um nível de significância.

## 5.5 PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA PARA PONDERAÇÃO ENTRE INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS (ETAPA 3)

O processo de análise hierárquica (AHP) foi originalmente desenvolvido e aplicado por Saaty (1990). Trata-se de uma ferramenta analítica compensatória, aplicável a problemas de decisão multiatributos formulados como uma árvore de decisão, onde cada nível hierárquico envolve diversos tipos de atributos. Com base em princípios matemáticos simples, o AHP permite que os agentes de decisão analisem aspectos rigorosa e metodicamente através de comparação, para realizar o ordenamento, varredura e/ou seleção de alternativas.

O AHP possui três características importantes (1) a *descrição hierárquica do problema* com o objetivo de manter o número de comparações pareadas necessárias dentro de um limite gerenciável; e (2) a incorporação direta do procedimento de *comparação em pares* juntamente com (3) uma abordagem pré-especificada para *conversão dos resultados das comparações em pesos* para os atributos considerados (método do *vetor eigen* principal) e uso dos resultados

obtidos em um teste heurístico da consistência das comparações pareadas efetuadas (NORRIS, MARSHALL, 1995).

Nesse processo, matrizes AHP, contendo indicadores de desempenho técnico-funcional, os comparam aos pares, por meio de uma escala de importância relativa, variando de 4 (muito mais importante); 2 (mais importante); 1 (mesma importância); 0,5 (menos importante); 0,25 (muito menos importante) e automaticamente geram os pesos para cada indicador, numa planilha eletrônica.

A aplicação do processo de análise hierárquica para atribuição de peso entre os indicadores técnico-funcionais, foi realizada por meio de consulta a um painel de especialistas, tomadores de decisão quanto ao sistema estrutural das edificações. O painel foi composto por três representantes das áreas de (i) engenharia estrutural - responsáveis técnicos pela maioria dos estudos de caso; (ii) empresariado da construção civil; e (iii) engenheiros e arquitetos representantes da área de construção de edificações. Em reuniões individuais, cada especialista teve a oportunidade de preencher uma planilha contendo a matriz de análise hierárquica e registrar seu voto. A média aritmética dos votos dos nove especialistas definiu os pesos atribuídos a cada um dos indicadores.

Desta forma, além da saída de resultados individuais dos indicadores, foi disponibilizado um resultado único do desempenho técnico-funcional ponderado, obtido por meio da agregação dos valores normalizados e ponderados dos indicadores. Este formato de apresentação de resultados facilita a definição da concepção estrutural de melhor desempenho, nas situações em que eles apontem tendências divergentes. A Figura 5.4 mostra um exemplo de planilha utilizada na consulta.

Escala de importância relativa		Ind1. Relação entre vão e altura, $(h/l) / m^2_{AE}$ (p/ lajes e vigas) $[m^{-2}_{AE}]$	Ind2. Relação entre altura de vigas e lajes, $(h_v/h_l) / m^2_{AE}$ $[m^{-2}_{AE}]$	Ind3. Densidade de pilares: número de pilares / área estrutural $[m^{-2}_{AE}]$	Ind5. Espessura equivalente: Volume de concreto / área estrutural $[m^3/m^2_{AE}]$	Ind6. Massa de aço / área estrutural $[kg/m^2_{AE}]$	Total da linha (T)	Importância relativa (%)
Muito mais importante	4	1,00					1,00	
Mais importante	2		1,00				1,00	
Igual	1			1,00			1,00	
Menos importante	1/2				1,00		1,00	
Muito menos importante	1/4					1,00	1,00	
<b>Total geral</b>							<b>5,00</b>	

Figura 5.4 – Exemplo de matriz AHP apresentada ao painel de especialistas para atribuição de pesos entre os indicadores técnico-funcionais.

### 5.6 CENÁRIOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS DIMENSÕES (ETAPA 4)

Com a aplicação dos indicadores aos trinta e um estudos de caso, espera-se quantificar o desempenho usual dos sistemas estruturais destas tipologias quanto aos referidos aspectos de sustentabilidade, e contribuir para o conhecimento de valores de referência destes indicadores, como um primeiro passo para futuras definições de metas visando a melhoria de desempenho dos sistemas estruturais em concreto.

Cenários de importância entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica foram predefinidos para ilustrar potenciais perspectivas de diferentes partes interessadas. Para tanto, é fornecida uma opção de saída de resultados em uma planilha, em que o usuário define os pesos (graus de importância) entre as três dimensões. Nesta tese, serão apresentados os resultados do desempenho global dos estudos de caso, para três cenários de importância relativa entre as dimensões, quais sejam, *cenário G1* - pesos iguais; *cenário G2* - pesos 0,2; 0,4; 0,4; e *cenário G3* - pesos 0,1; 0,8; 0,1 atribuídos aos desempenhos ponderados das dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica, respectivamente.







## 6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados do conjunto de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico calculado para os trinta e um estudos de caso de sistemas estruturais em concreto armado e protendido de edificações verticais, residenciais e comerciais, de acordo com as etapas propostas no capítulo 5, de abordagem metodológica.

### 6.2 COMPOSIÇÃO DE LISTA DE INDICADORES COM BASE EM REQUISITOS DE DESEMPENHO (ETAPA 1)

Com relação à lista final de indicadores validados no pré-teste (Quadro 5.9 do Capítulo 5), ressalta-se que não foi observada a necessidade de indicadores substitutos para as fases preliminares do projeto, uma vez que os indicadores podem ser calculados desde a fase de anteprojeto até o projeto executivo. Recomenda-se, no entanto, que na aplicação do conjunto validado de indicadores a um processo de projeto, seu cálculo seja revisto à medida que os dados sejam refinados ao longo do processo.

O indicador *Potencial de reuso* não foi validado, pois as estruturas dos estudos de caso foram todas moldadas *in loco*, e seus projetos não foram desenvolvidos visando a desmontagem. Entretanto, constou da lista, pois espera-se que em um futuro breve, projetistas e demais tomadores de decisão do setor de edificações atentem para a importância de minimizar seu consumo de recursos e considerem, entre as alternativas para este propósito, o potencial de reuso do sistema estrutural. Os aspectos e impactos ambientais quantificados nesta tese, referentes aos trinta e um estudos de caso, poderão contribuir para esta conscientização.

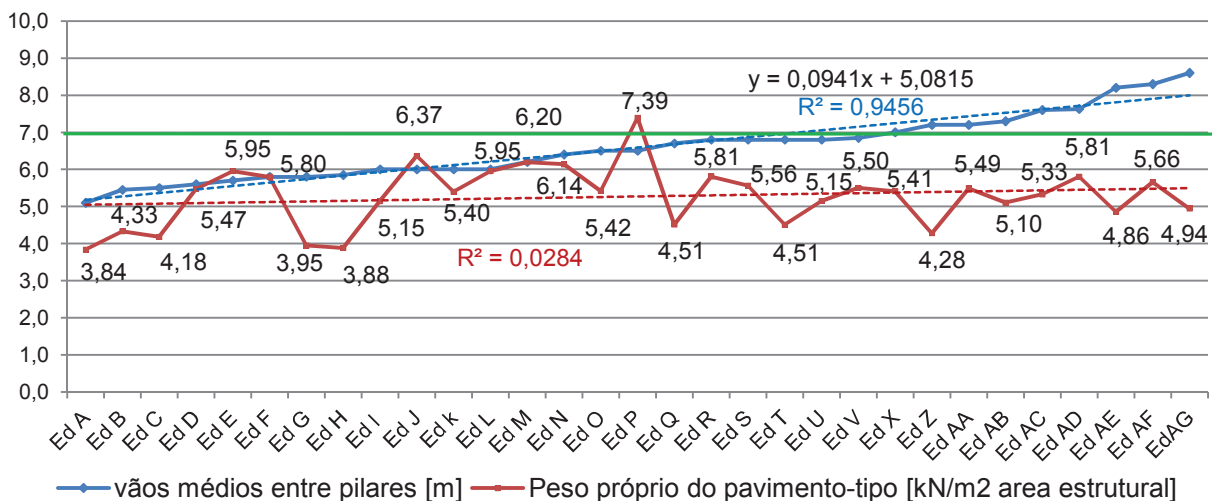
Nesse contexto, cita-se a abordagem proposta por Gijsbers e outros (2009) (*vide* item 2.3.1, capítulo 2), em que questionaram a adaptabilidade ao uso ou a flexibilidade obtida por um aumento de capacidade por meio da adoção de grandes vãos e pavimentos livres de pilares, considerando que esta medida resultaria em uso excessivo de recursos, enquanto esta capacidade extra poderia nem vir a ser aproveitada ao longo da vida útil. Os autores sugeriram como

indicador de desempenho funcional de edificações verticais a “*relação entre vãos de lajes maciças e alveolares e massa do pavimento por unidade de área*” [ $\text{m}/(\text{kg}/\text{m}^2)$ ] (GIJSBERS et al., 2009).

Os referidos pesquisadores realizaram uma consulta a cerca de 270 usuários de edificações multifamiliares na cidade de Eindhoven, confirmando a demanda dos usuários por adaptabilidade ao uso expressa por *amplitude de área superficial, de alturas de piso ao teto, alvenarias de vedação interna deslocáveis*, dentre outras. Demandas como essas são capturadas pelos indicadores técnico-funcionais 3 a 5 (Quadro 5.9 do Capítulo 5), aplicáveis não só a lajes maciças e alveolares, mas a quaisquer tipos de sistema de lajes em concreto, com ou sem vigas, como os validados nesta tese.

Destaca-se, quanto ao questionamento levantado por Gijbers e outros (2009), que a adoção de grandes vãos e pavimentos livres de pilares favorece a construtibilidade, aumentando a produtividade no canteiro de obras, reduzindo custos de produção e de mão-de-obra (minimizando consumo de fôrmas, por exemplo), como observado por Batlouni Neto (2011). Esta, portanto, pode ser uma estratégia custo-ambientalmente eficiente, além de satisfazer às demandas de adaptabilidade funcional colhidas naquela pesquisa. Isto se observa, desde que se verifique um ponto de equilíbrio para cada projeto. Para tanto, os indicadores funcionais 1 e 2 (espessura equivalente de concreto e massa de aço por área estrutural) monitoram o ponto de equilíbrio, com os consumos de concreto e aço e, conseqüentemente, o peso próprio da edificação.

Esta análise foi feita a partir dos dados dos pavimentos-tipo referentes ao volume de concreto e à massa de aço das armaduras ativas e passivas apresentados na tabela 5.1 (capítulo 5), e chegando-se à estimativa de peso próprio por unidade de área estrutural [ $\text{kN}/\text{m}^2$ ], que, relacionado aos vãos médios entre pilares (tabela 5.3 do capítulo 5), demonstrou que a adoção de vãos maiores e menor número de pilares no pavimento-tipo não necessariamente resulta em uso excessivo de recursos. A Figura 6.1 mostra que, para os casos estudados, não existe tal correlação.



**Figura 6.1 – Vãos médios entre pilares e peso próprio do pavimento-tipo das trinta e uma edificações dos estudos de caso**

Linhas de tendência são indicadas. Os pontos em azul, situados acima ou sobre a linha verde, correspondem aos sistemas estruturais com vão médio entre pilares maior ou igual a 7,0m. Verificou-se que estes sistemas estruturais possuem peso próprio igual a 5,33kN/m<sup>2</sup> (mediana), enquanto os de vão médio entre pilares menor que 7,0m (indicados abaixo da linha verde) possuem peso próprio levemente superior (~ 2%), igual a 5,44kN/m<sup>2</sup> (mediana).

Ressalta-se também, que o conjunto de indicadores técnico-funcionais proposto nesta tese, contempla e avança em relação à pesquisa desenvolvida por Soetanto e outros (2006) (*vide* capítulo 2, item 2.3), em que foram discutidos requisitos e critérios de desempenho de sistemas estruturais sem, no entanto, chegar-se à proposição de indicadores. Os pesquisadores entenderam que, no curto prazo, a estrutura deve satisfazer a requisitos imediatos, tais como construção executada no prazo e orçamento previstos, e a longo prazo, ela deve permitir, por exemplo, o grau de adaptabilidade ao uso determinado pelo cliente, ou ser projetada para demolição e reciclagem com ligações entre elementos projetadas adequadamente. Percebe-se, portanto, que os indicadores funcionais e o indicador econômico (discutido adiante) aqui propostos capturam os requisitos mencionados.

## 6.3 VALIDAÇÃO (ETAPA 2)

### 6.3.1 Indicadores técnico-funcionais

A Tabela 6.1 mostra os resultados dos indicadores técnico-funcionais calculados com os dados de projeto mostrados na Tabela 5.3 (capítulo 5). Os consumos de concreto e aço por unidade de área estrutural, quer seja do pavimento-tipo ou da superestrutura, referem-se a dados de projeto e desconsideram consumo de aço e concreto em atividades de recuperação/manutenção. As áreas estruturais do pavimento-tipo e da superestrutura foram utilizadas como unidade funcional para os indicadores calculados nos dois níveis. Limitam-se, portanto, ao estágio de pré-uso da edificação. Os nomes das edificações dos estudos de caso em concreto armado (CA) estão em negrito, assim como os melhores resultados de cada indicador.

**Tabela 6.1 - Resultados dos cinco indicadores técnico-funcionais referentes aos pavimentos-tipo e resultados dos indicadores 1 e 2 para superestrutura**

Edificação	Pavimento-tipo					Superestrutura	
	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind5	Ind1	Ind2
	Consumo de Concreto* / [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> AE]	Consumo de aço* / [kg/m <sup>2</sup> AE]	Relação entre altura e vão de laje [d / l / m AE]	Densidade de pilares [n <sup>o</sup> pilares / m <sup>2</sup> AE]	Relação entre Altura de viga e laje [m/m <sup>2</sup> AE]	Consumo de Concreto* / [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub> ]	Consumo de aço* / [kg/m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub> ]
<b>Ed A</b>	<b>0,15</b>	13,58	5,15E-05	0,0561	0,0013	0,15	14,43
Ed B	0,18	9,80	5,38E-05	0,0327	0,0022	0,24	18,93
Ed C	0,17	8,49	3,88E-05	0,0504	0,0013	0,21	<b>11,81</b>
Ed D	0,22	21,75	2,89E-05	0,0293	0,0013	0,23	21,51
Ed E	0,24	20,35	8,32E-05	0,0531	0,0024	0,24	19,51
Ed F	0,23	19,71	4,23E-05	0,0319	0,0016	0,19	14,53
<b>Ed G</b>	0,16	15,38	7,83E-05	0,0890	0,0236	0,19	15,50
<b>Ed H</b>	0,16	14,75	3,81E-05	0,0579	0,0075	0,17	15,58
<b>Ed I</b>	0,21	19,89	7,53E-05	0,0643	0,0201	0,23	23,02
Ed J	0,26	14,09	4,64E-05	0,0377	0,0015	0,25	23,87
<b>Ed K</b>	0,21	24,29	6,86E-05	0,0301	0,0016	0,21	23,79
<b>Ed L</b>	0,24	24,62	9,90E-05	0,0471	0,0045	0,25	27,83
Ed M	0,25	28,19	1,93E-04	0,0760	0,0058	0,25	28,11
Ed N	0,25	25,31	6,54E-05	0,0448	0,0025	0,25	26,91
<b>Ed O</b>	0,21	32,00	9,07E-05	0,0486	0,0024	0,20	29,07
Ed P	0,29	33,95	4,69E-05	0,0404	0,0016	0,23	24,71
<b>Ed Q</b>	0,18	22,82	5,06E-05	0,0561	0,0129	0,21	25,89
Ed R	0,23	22,66	9,28E-05	0,0453	0,0030	0,24	23,70
Ed S	0,22	25,40	6,46E-05	0,0378	0,0021	0,23	23,86

AE = área estrutural do pavimento-tipo; AE<sub>tot</sub> = área estrutural da superestrutura.

**Tabela 6.1 - Resultados dos cinco indicadores técnico-funcionais referentes aos pavimentos-tipo e resultados dos indicadores 1 e 2 para superestrutura (cont.)**

Edificação	Pavimento-tipo					Superestrutura	
	Ind1	Ind2	Ind3	Ind4	Ind5	Ind1	Ind2
	Consumo de Concreto* / [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	Consumo de aço* / [kg/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	Relação entre altura e vão de laje <sup>2</sup> [d/l / m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	Densidade de pilares [n <sup>o</sup> pilares / m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	Relação entre Altura de viga e laje <sup>2</sup> [m/m/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	Consumo de Concreto* / [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub> ]	Consumo de aço* / [kg/m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub> ]
Ed T	0,18	16,25	6,01E-05	0,0523	0,0145	0,23	16,64
Ed U	0,21	19,15	7,19E-05	0,0336	0,0024	0,21	19,22
Ed V	0,22	24,25	9,66E-05	0,0455	0,0027	0,22	23,33
Ed X	0,22	19,23	6,37E-05	0,0431	0,0027	0,22	17,30
Ed Z	0,17	<b>8,41</b>	9,84E-05	0,0717	0,0154	0,18	15,85
Ed AA	0,22	10,78	2,38E-05	0,0389	0,0009	0,20	17,71
Ed AB	0,21	16,63	2,68E-05	0,0556	0,0008	0,18	18,16
Ed AC	0,21	19,33	<b>1,58E-05</b>	0,0331	<b>0,0007</b>	<b>0,13</b>	19,08
Ed AD	0,24	12,05	1,12E-04	0,0453	0,0035	0,23	18,08
Ed AE	0,20	16,45	3,78E-05	<b>0,0255</b>	0,0012	0,21	14,82
Ed AF	0,23	19,12	8,37E-05	0,0447	0,0028	0,21	17,73
EdAG	0,20	14,53	3,78E-05	0,0360	0,0013	0,21	15,70

AE = área estrutural do pavimento-tipo; AE<sub>tot</sub> = área estrutural da superestrutura.

O Apêndice B mostra os valores máximo e mínimo, a mediana e a variabilidade dos resultados dos indicadores técnico-funcionais considerados. A Tabela 6.2 resume a análise estatística dos indicadores ao nível de significância de 5%.

**Tabela 6.2 - Resultados de Mann-Whitney U e p-valor e para indicadores do pavimento-tipo dos grupos CA e CP (Stathsoft Statistica 10)**

Variável	Soma dos Postos CA	Soma dos Postos CP	U	p-valor
Relação entre volume de concreto e área estrutural (espessura equivalente) [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	113,0	383,0	47,0	<b>0,010</b>
Relação entre massa de aço e área estrutural (consumo de aço) [kg/ m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	184,0	312,0	102,0	0,760
Relação entre a altura e o vão (h/l)/ m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> [m <sup>-2</sup> ]	218,0	278,0	68,0	0,090
Relação entre o número de pilares e a área estrutural do pavimento (Densidade de pilares) [m <sup>-2</sup> ]	248,0	248,0	54,0	<b>0,003</b>
Relação entre alturas de vigas e lajes (hv/hl)/ m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> [m <sup>-2</sup> ]	247,0	249,0	38,0	<b>0,000</b>

Apenas os valores de *consumo de aço* [kg/m<sup>2</sup><sub>AE</sub>] e *relação* (h/l)/ m<sup>2</sup><sub>AE</sub> [m<sup>-2</sup><sub>AE</sub>] foram estatisticamente iguais para os grupos de estruturas em concreto armado (CA) e estruturas em concreto protendido (CP). Os pavimentos-tipo em CA apresentaram menor consumo de concreto

e mesmo consumo de aço que os pavimentos-tipo em CP. Estes pavimentos-tipo em CP tiveram melhor desempenho quanto a densidade de pilares e relação  $(h_v/h_l)/ m_{AE}^2$ , apresentando medianas menores que os de CA.

Os indicadores de consumo de aço e de concreto foram calculados tanto para pavimento-tipo, quanto para superestrutura (Apêndice B) e, comparados ao nível de significância de 5%, apresentaram valores estatisticamente iguais nas duas situações (Tabela 6.3). Isto confirma a validade da prática corrente dos escritórios de projeto estrutural em considerar uma projeção dos dados do pavimento-tipo para todo o sistema estrutural. Vale ressaltar que, no cálculo dos indicadores do pavimento-tipo, foram computados além das lajes, vigas e escadas, os pilares de um andar-tipo. O total de aço atribuído a estes pilares foi um valor médio obtido pela massa total de aço dos pilares da superestrutura dividida pelo número de pavimentos.

**Tabela 6.3 - P-valor calculado para análise comparativa de resultados de indicadores entre pavimento-tipo e superestrutura (Stathsoft Statistica 10)**

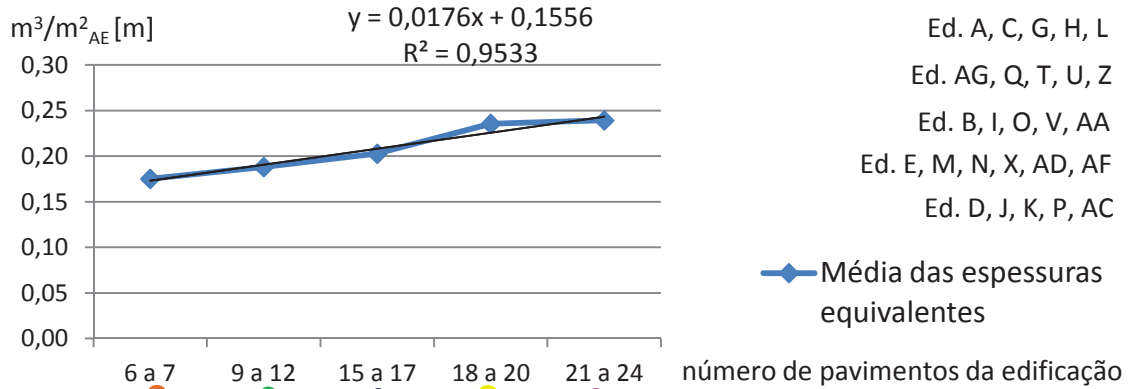
<i>Variável</i>	<i>N</i>	<i>T</i>	<i>Z</i>	<i>p-valor</i>
Espessura equivalente: Relação entre volume de concreto e área estrutural $[m^3/m^2]$	31	197,00	1,00	0,32
Relação entre massa de aço e área estrutural $[kg/m^2]$	31	180,00	1,33	0,18

Antes de situar estes resultados em relação aos obtidos por outros pesquisadores, vale destacar que, embora os indicadores *relação entre vão e altura* ( $\ell/h$ ) e *área de influência de pilares* ( $m_{AE}^2/n^\circ$  pilares) sejam comumente utilizados em projeto estrutural e já tenham sido considerados em pesquisas anteriores (BATLOUNI NETO, 2003; 2011), nesta tese, os inversos destes indicadores foram considerados,  $(h/\ell)/m_{AE}^2$  e  $n^\circ$  pilares/ $m_{AE}^2$ , todos por unidade de área estrutural, para que normalizados, tenham a mesma interpretação dos demais indicadores técnico-funcionais ( $h_v/h_l/m_{AE}^2$ , consumo de aço,  $kg/m_{AE}^2$ , e consumo de concreto,  $m^3/m_{AE}^2$ ), qual seja, quanto menor o valor do indicador, melhor o desempenho, e, desta forma, possam ser agregados.

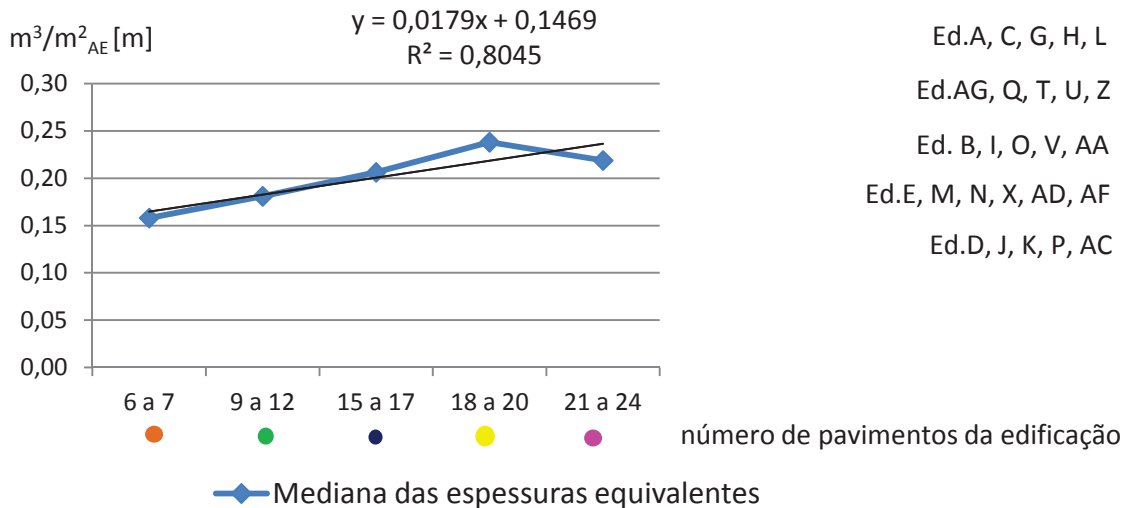
Com relação ao indicador consumo de concreto/ $m_{AE}^2$  área estrutural também conhecido por espessura equivalente, os resultados obtidos por Batlouni Neto (2003) (*vide* item 2.3, capítulo 2) mostraram que ele cresce com a altura da edificação, o número de pavimentos, a área de influência do pilar, dentre outras correlações. Os resultados obtidos nesta pesquisa, referentes às 26 edificações residenciais<sup>1</sup>, confirmam haver uma correlação linear significativa ( $R^2=0,9533$  para médias e

<sup>1</sup> As edificações comerciais foram excluídas desta comparação.

$R^2=0,8045$  para medianas) entre a espessura equivalente e o número de pavimentos, conforme mostram as Figura 6.2 e Figura 6.3 para 5 intervalos de altura, representada pelo número de pavimentos. Desta forma, as diferentes alturas dos sistemas estruturais das edificações residenciais foram divididas em cinco grupos, quatro contendo cinco edificações por grupo, com os seguintes números de pavimentos: (6 a 7), (9 a 12), (15 a 17), e (21 a 24); e um grupo de seis edificações com 18 a 20 pavimentos.



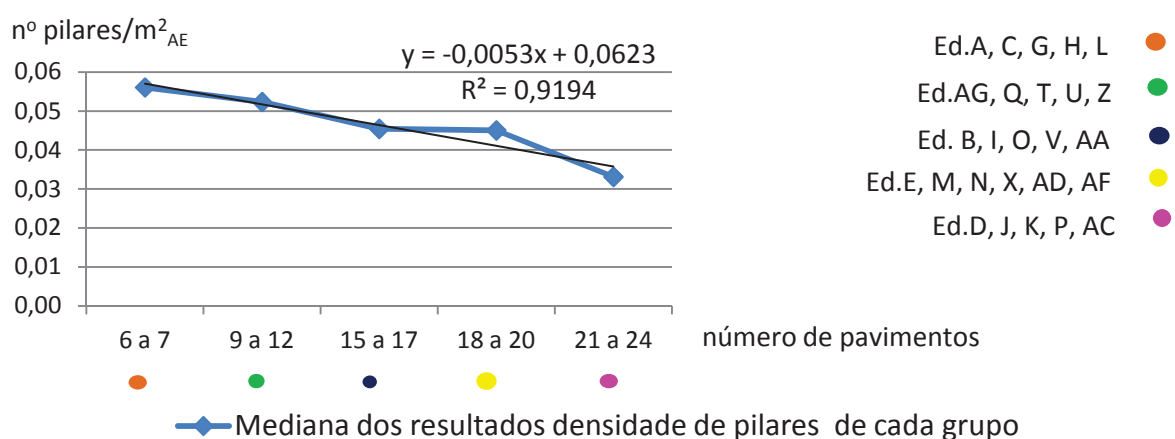
**Figura 6.2 – Correlação entre consumo de concreto e altura dos sistemas estruturais, expressa pela média das espessuras equivalentes das estruturas por intervalo de número de pavimentos das edificações residenciais**



**Figura 6.3 – Correlação entre consumo de concreto e altura dos sistemas estruturais, expressa pela mediana das espessuras equivalentes das estruturas por intervalo de número de pavimentos das edificações residenciais**

Com relação à área de influência dos pilares referida por Batlouni Neto (2011), trata-se do inverso do indicador 4 (Tabela 6.1), *densidade de pilares*, conforme explicado anteriormente.

Observa-se, também, uma correlação linear significativa ( $R^2=0,9194$ ) entre *densidade de pilares* e o número de pavimentos da edificação. A Figura 6.4 mostra as medianas dos resultados deste indicador para os mesmos intervalos de altura considerados anteriormente. Consegue-se assim, estabelecer, de modo bastante simples, uma correlação entre densidade de pilares e nº de pavimentos da edificação, em que quanto maior o número de pavimentos menor a densidade de pilares, ou seja, maiores são os vãos entre eles. Isto explica também, a razão do aumento da espessura equivalente com o aumento do número de pavimentos, pois vãos maiores entre pilares, representam maiores panos de lajes e vãos de vigas, que requerem alturas maiores aumentando o consumo de concreto.



**Figura 6.4 - Correlação entre densidade de pilares e altura dos sistemas estruturais, expressa pela mediana do inverso da área de influência dos pilares para cada intervalo de número de pavimentos das edificações residenciais**

### 6.3.1.1 Normalização dos indicadores técnico-funcionais

Os indicadores devem ser previamente normalizados para que possam ser submetidos a qualquer sistema de ponderação. A normalização é feita dividindo-se o valor do indicador por um valor de referência que pode ser escolhido livremente, conforme seu significado no contexto de análise. É comum utilizar valores de referência correspondentes a determinada região ou país, divididos pelo número de habitantes (GOEDKOOOP et al., 2010a). Tendo em vista, a inexistência de dados de referência publicados na literatura nacional específicos para edificações brasileiras, ou partes dela, os resultados dos indicadores de desempenho de todos os sistemas estruturais em estudo foram normalizados em relação à edificação X, que obteve para o pavimento-tipo, o maior número de resultados de indicadores ambientais coincidentes com as medianas da amostra estudada.



### 6.3.2 Processo de análise hierárquica para ponderação dos indicadores técnico-funcionais (etapa 3)

O resultado da consulta ao painel de especialistas obtido com a média aritmética dos votos definiu os pesos atribuídos a cada um dos indicadores validados, como indicado na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4 – Resultado da consulta ao painel de especialistas: ponderação atribuída aos indicadores técnico-funcionais**

Engenheiros projetistas estruturais			Arquitetos			Engenheiros empresários da construção civil			Média final entre votantes	Indicadores
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
0,23	0,26	0,25	0,35	0,25	0,23	0,20	0,32	0,19	0,25	h/l
0,08	0,20	0,06	0,22	0,18	0,16	0,14	0,24	0,25	0,17	hv/hl
0,21	0,11	0,20	0,22	0,18	0,24	0,30	0,13	0,31	0,21	Densidade de Pilares
0,22	0,19	0,25	0,10	0,18	0,25	0,23	0,17	0,13	0,19	Consumo concreto/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub>
0,25	0,25	0,25	0,10	0,20	0,13	0,12	0,15	0,13	0,18	Consumo de aço/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub>
Total:									100%	

Como recomendado para sistemas de ponderação adotados por vários sistemas de avaliação de impactos ambientais (BUDAVARI et al., 2011; GOEDKOOOP et al., 2010a), além do cenário T1, com pesos derivados por AHP (Tabela 6.4) foi realizada também uma ponderação com pesos iguais (cenário T2) para análise de sensibilidade, ou seja, para verificar se a ponderação distorce os resultados.

Os pesos foram, então, multiplicados pelos indicadores técnico-funcionais (Tabela 6.1 - ), previamente normalizados em relação à Ed. X. A Tabela 6.5 resume os cenários de ponderação utilizados para os indicadores técnico-funcionais.

**Tabela 6.5 – Cenário T1 - Resultado da consulta ao painel de especialistas: ponderação por AHP atribuída aos indicadores técnico-funcionais e cenário T2 - ponderação com pesos iguais para análise de sensibilidade**

Indicadores	Cenário T1 (painel especialistas) Pesos derivados por AHP	Cenário T2 Pesos iguais
h/l	25	20
hv/hl	17	20
Densidade de Pilares	21	20
Consumo concreto/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub>	19	20
Consumo de aço/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub>	18	20

A exemplifica o processo para o cálculo do indicador de desempenho técnico-funcional ponderado e agregado, com os dados do sistema estrutural da edificação C. Assim, os resultados

deste processo para todos os estudos de caso são mostrados na Figura 6.6, onde o menor resultado indica o sistema estrutural com melhor desempenho técnico-funcional.

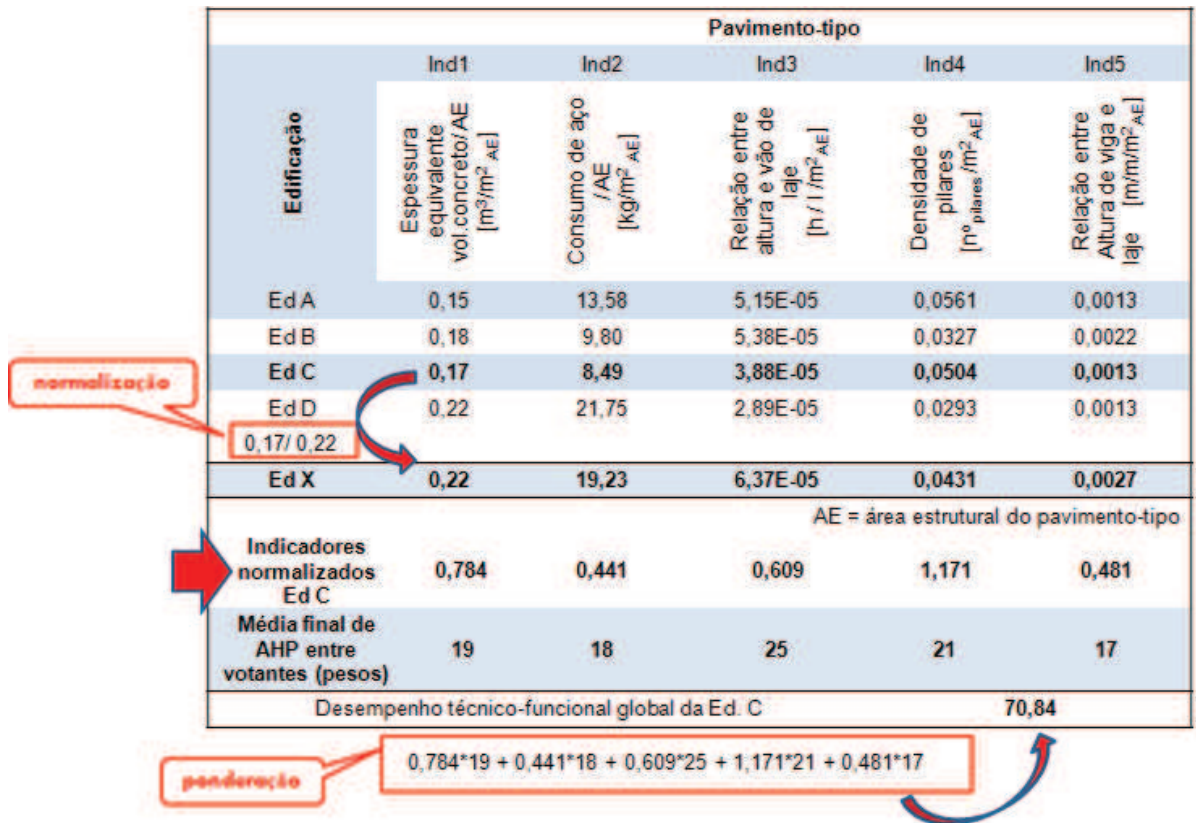


Figura 6.5 – Cálculo dos indicadores de desempenho técnico-funcional ponderados e agregados, exemplificados para o sistema estrutural da Ed. C

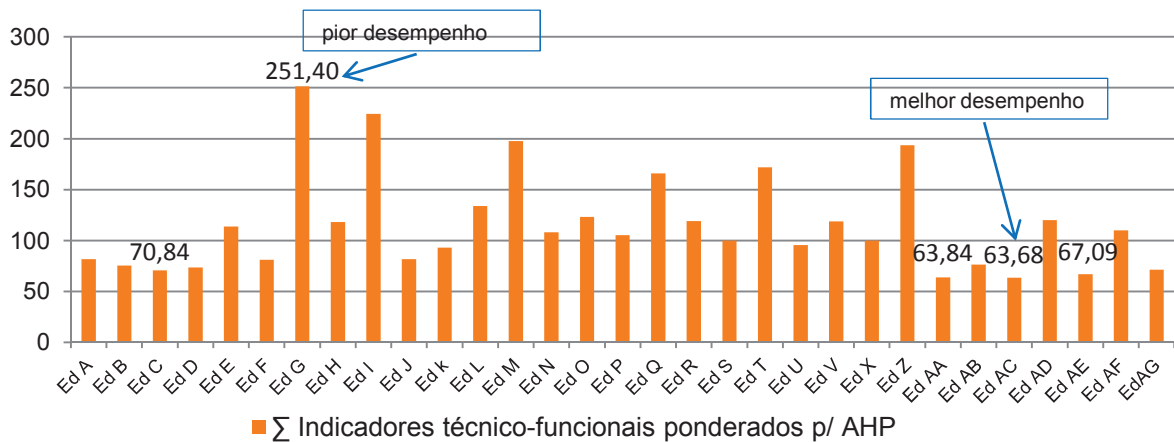
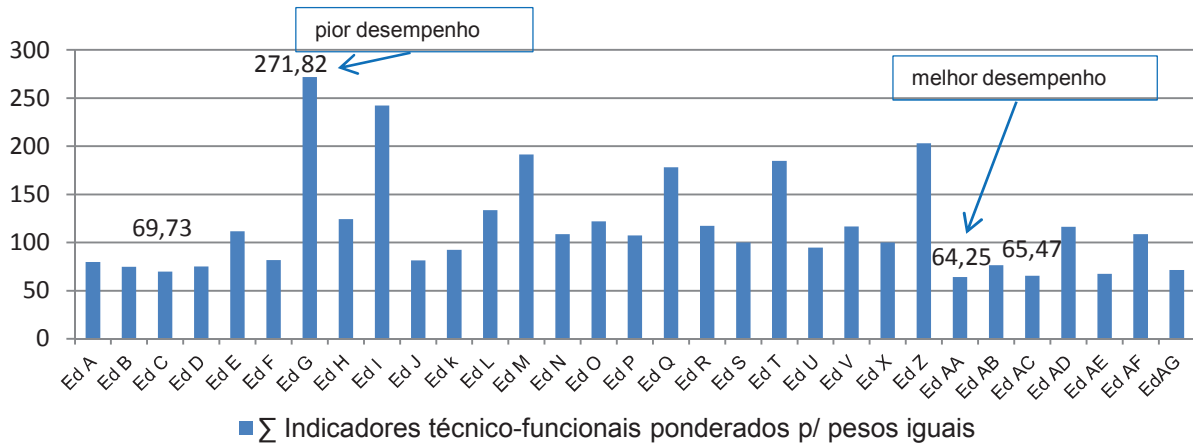


Figura 6.6 - Desempenho técnico-funcional global dos pavimentos-tipo das edificações, expresso em um resultado único obtido pelo somatório dos indicadores técnico-funcionais normalizados, ponderados segundo o cenário T1 (AHP)

A Figura 6.7 mostra os resultados da ponderação igualitária aplicada aos indicadores técnico-funcionais. Percebe-se não ter havido diferença entre resultados dos dois procedimentos de ponderação (Figura 6.6 e Figura 6.7), que indicaram o pior desempenho técnico-funcional da Ed.G em concreto armado e o melhor desempenho da Ed.AA seguida pela Ed.AC para o cenário T2 e na ordem inversa para o cenário T1, ambas em concreto protendido.



**Figura 6.7 - Desempenho técnico-funcional global dos pavimentos-tipo das edificações, expresso em um resultado único obtido pelo somatório dos indicadores técnico-funcionais normalizados, ponderados segundo o cenário T2 (pesos iguais)**

### 6.3.3 Indicadores ambientais

#### 6.3.3.1 Estimativa da vida útil das lajes do pavimento-tipo das edificações

A Tabela 6.6 apresenta os dados de projeto utilizados nos cálculos da vida útil estimada (VUe) pelo software *Life-365 v.2.1.1* para as lajes dos pavimentos-tipo dos estudos de caso.

**Tabela 6.6 – Resultados e dados utilizados para cálculo da vida útil das lajes dos pavimentos-tipo com o software *Life-365 v.2.1.1***

Edificação	Relação água- materiais cimentícios / teor de escória %	Cobrimento mínimo das lajes [cm]	Espessura h das lajes [cm]	Espessura equivalente $h_{eq}$ p/ laje nervurada [cm]	Área de entrada no software [m <sup>2</sup> ]	VUe lajes [anos]
Ed A	0,5 / 66	2	27,5	14,7	824	11,7
Ed B	0,5 / 66	2	18,00	-	449	11,2
Ed C	0,5 / 66	2	18,00	-	733	11,2
Ed D	0,5 / 66	2	18,00	-	913	11,2
Ed E	0,5 / 66	2	20,00	-	497	12,1
Ed F	0,5 / 66	2	18,00	-	812	11,2
Ed G	0,5 / 66	2	12,00	-	326	11,9
Ed H	0,5 / 66	2	12,00	-	717	11,9
Ed I	0,6 / 66	2	12,00	-	428	10,4
Ed J	0,5 / 66	2	20,00	-	846	12,1
Ed k	0,5 / 66	2	26,00	16,6	818	11,6
Ed L	0,5 / 66	2	30,00	15,0	707	11,8
Ed M	0,5 / 66	2	18,00	-	234	11,2
Ed N	0,5 / 66	2	18,00	-	548	11,2
Ed O	0,5 / 66	2	25,00	15,7	557	11,2
Ed P	0,5 / 66	2	23,00	-	822	11,2
Ed Q	0,5 / 66	2	13,00	-	490	11,7
Ed R	0,5 / 66	2	20,00	-	385	12,1
Ed S	0,5 / 66	2	18,00	-	585	11,2
Ed T	0,5 / 66	2	12,00	-	519	11,9
Ed U	0,5 / 66	2	18,00	-	479	11,2
Ed V	0,5 / 66	2	26,00	-	315	11,8
Ed X	0,5 / 66	2	18,00	-	449	11,2
Ed Z	0,5 / 66	2	14,00	-	349	11,4
Ed AA	0,5 / 66	2	18,00	-	1344	11,2
Ed AB	0,5 / 66	2	18,00	-	1397	11,2
Ed AC	0,5 / 66	2	18,00	-	1651	11,2
Ed AD	0,5 / 66	2	18,00	-	378	11,2
Ed AE	0,5 / 66	2	28,00	11,7	1440	11,5
Ed AF	0,5 / 66	2	18,00	-	453	11,2
EdAG	0,5 / 66	2	20,00	-	778	12,1

Para as condições de exposição, foram consideradas (i) a distância de 800m do mar; e (ii) as médias mensais de temperatura<sup>2</sup> da cidade do Rio de Janeiro, RJ, (para o Ed. AB): 24°C nos meses 1, 3 e 4; 25°C no mês 2; 22°C nos meses 5 e 11; 21°C nos meses 6, 7 e 10; 20°C nos meses

<sup>2</sup> Obtidas de arquivo epw a partir de dados de estações meteorológicas do aeroporto de Vitória, ES e da Vila Militar no RJ.

8 e 9; e 23°C no mês 12, e para os demais casos, da cidade de Vitória, ES, quais sejam, 26°C de janeiro a maio, 25°C em junho, 24°C de julho a novembro e 25°C em dezembro.

### 6.3.3.2 Análise de sensibilidade das estratégias para aumento da vida útil

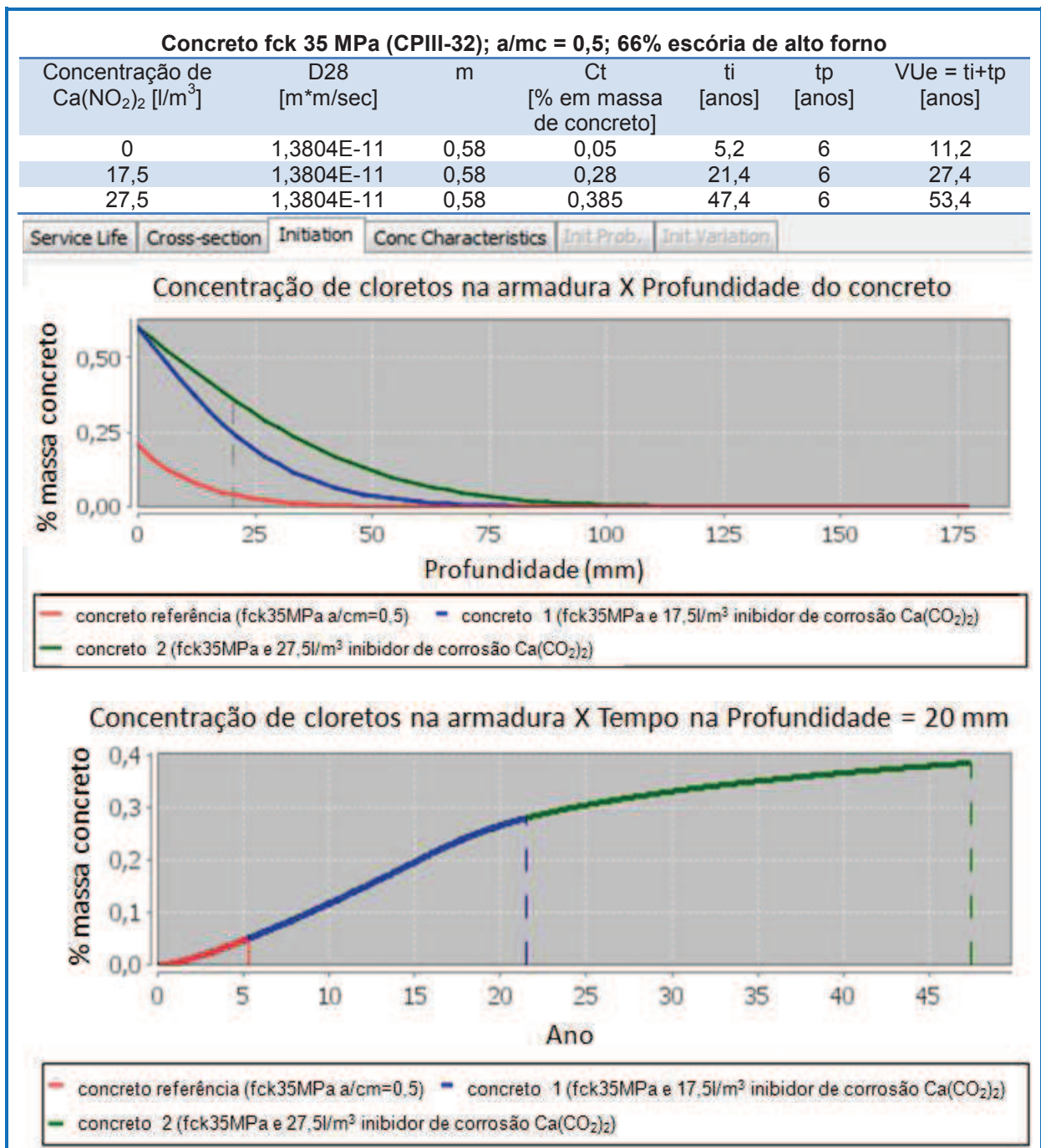
Diante de valores tão baixos, comparados à VUP mínima de 50 anos exigida na ABNT NBR 15575:2013, decidiu-se prosseguir com a análise de sensibilidade em relação às estratégias oferecidas pelo software para aumento da vida útil, quais sejam, (1) utilização de inibidores químicos de corrosão, (2) aumento do cobrimento das armaduras, (3) adoção de um programa de manutenção e reparos, (4) uso de seladores ou (5) de membranas, (6) especificação de armaduras em aço inoxidável, e (7) uso de sílica ativa como adição mineral.

Considerando-se a prática de engenharia nacional no setor de edificações, além da adoção de um programa de manutenção e reparos, apenas o uso de inibidores (não usual) e de sílica ativa parecem viáveis, embora o aumento do cobrimento mereça investigação, mesmo privado do apoio do setor.

O uso de sílica ativa não foi abordado nesta pesquisa, pois o cimento considerado na modelagem dos concretos foi o CPIII-32, que possui 66% de adição de escórias de alto forno e é o mais comumente utilizado na região de estudo. Com ele, a constante  $m$  utilizada no modelo para cálculo do coeficiente de difusão de cloretos (Equações 5.2 e 5.3 do capítulo 5, de abordagem metodológica) já atingiu o valor 0,58, sendo 0,6 o valor máximo considerado pelo software. A estratégia da adição de sílica ativa, portanto, além de exigir novos desenhos de dosagens de concreto para os fck especificados nos projetos e requantificação de todos os parâmetros correspondentes, não impactaria os resultados de VUe já obtidos.

#### 6.3.3.2.1 Análise de sensibilidade quanto ao teor de inibidor de corrosão nitrito de cálcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) na mistura

Com relação ao emprego de inibidores químicos de corrosão na mistura de concreto, foi realizada uma análise de sensibilidade, cujos resultados são descritos na Figura 6.8. Nela vê-se o efeito desta estratégia na vida útil estimada, que aumentou cerca de 2,5 vezes na mistura contendo 17,5litros de  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2/\text{m}^3$  – insuficiente, porém, para alcançar a  $VUP_{\min}$  – e cerca de 4,8 vezes na mistura com 27,5litros  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2/\text{m}^3$ . Para essa mistura, a VUe calculada no software ultrapassa a  $VUP_{\min}$ , dispensando-se o cronograma de reparos que é uma das estratégias consideradas viáveis, oferecidas pelo *Life-365 v2.1.1*.



**Figura 6.8 - Relatório de VUe para lajes do pavimento-tipo do Ed. AB, situado a 800m do mar, RJ, para diferentes teores de  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  como inibidor de corrosão (tela do software *Life-365 v.2.1.1*)**

A Figura 6.8 mostra, ainda, que a mistura sem uso de inibidor atinge o *período de iniciação* em torno de cinco anos, com uma concentração de cloretos na armadura de cerca de 0,05% em massa de concreto, enquanto que as misturas com  $17,5\text{l}/\text{m}^3$  e  $27,5\text{l}/\text{m}^3$  de  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  atingem o *período*

de iniciação em 21anos e 47 anos, respectivamente, com concentrações de cloretos nas armaduras de 0,28% e 0,385% em massa de concreto.

#### 6.3.3.2.2 Análise de sensibilidade quanto à variação do cobrimento

Com relação à estratégia de aumento do cobrimento, algumas considerações se fazem necessárias. De acordo com a ABNT NBR 6118:2007<sup>3</sup>, o cobrimento nominal ( $C_{nom}$ ) é definido como o cobrimento mínimo ( $C_{min}$ ) acrescido de uma tolerância de execução ( $\Delta_c$ ). Para situações usuais, para lajes de concreto armado em ambiente marinho (classe III de agressividade), recomenda-se um  $C_{nom}$  de pelo menos 3,5 cm, com  $\Delta_c$  de 1,0 cm.

Nesta pesquisa foi considerada a prática corrente de projeto estrutural - refletida nos trinta e um projetos fornecidos por três renomados escritórios de cálculo estrutural do Espírito Santo - que adota, para lajes de edificações residenciais e comerciais em ambiente marinho, um  $C_{min}$  de 2,0 cm e explicita em projeto uma tolerância de execução ( $\Delta_c$ ) de 0,5 cm, compatível com um controle rigoroso.

Esta atitude é respaldada pela própria ABNT NBR 6118:2007<sup>3</sup>, que admite considerar uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura, e pressupor um controle rigoroso de execução ( $\Delta_c = 0,5$  cm), desde que explicitado no projeto (Tabela 6.1 ABNT NBR 6118:2007). Desta forma, o  $C_{nom}$  das armaduras passivas nas lajes passa de, pelo menos 3,5 cm (classe III) para 2,5 cm (classe II), e finalmente para os 2,0 cm adotados nos projetos, depois de considerada a redução adicional de 0,5 cm, associada ao controle rigoroso de execução.

Dispensando esta tolerância da referida norma e considerando, portanto, a adoção de  $C_{min}$  igual a 3,0cm, mantendo-se os demais parâmetros constantes para o exemplo de lajes da Ed AB, chega-se ao valor de VUe igual a 16,2 anos. Este resultado é 45% superior à VUe calculada nas mesmas condições para um cobrimento de 2,0cm (11,2 anos). Ainda assim, a VUe representa cerca de um terço do que seria necessário para atender à  $VUP_{min}$  exigida pela ABNT NBR 15575-1:2013 para o sistema estrutural, o que sugere a pertinência em se analisar a adoção de valores ainda maiores para o cobrimento.

A adoção de cobrimentos além de 3,0cm não foi abordada nesta pesquisa, uma vez que isto exigiria o redimensionamento completo da estrutura, devido ao aumento de peso próprio com a

---

<sup>3</sup> Assim como no novo texto da ABNT NBR 6118:2013, em consulta nacional no site da ABNT (agosto/2013).

manutenção da altura útil de cálculo, ou, o redimensionamento das armaduras das lajes devido à redução de sua altura útil, na hipótese de se conseguir manter a altura total e por conseguinte, seu peso próprio, no dimensionamento.

Diante disso, duas estratégias poderiam ser consideradas:

- (1) aplicação do inibidor de corrosão, que exigiria a quantificação do seu consumo nos sistemas estruturais das edificações estudadas, a verificação de disponibilidade e custo de aquisição no mercado nacional, bem como a realização da ACV do material para consideração de seus impactos no cálculo dos indicadores de desempenho ambiental e inclusão de seus custos no cálculo do custo do ciclo de vida dos estudos de caso;
- (2) previsão de eventos de reparos para assegurar a  $VUP_{\min}$  de 50 anos para todos os estudos de caso.

Por se considerar que a previsão de um cronograma de manutenção e reparos constitua a prática típica, e a recomendação da ABNT NBR 15575-1:2013 de que ...“*sejam previstas e realizadas manutenções preventivas sistemáticas e, sempre que necessário, manutenções com caráter corretivo para que a VUP seja alcançada*”, a estratégia (2) foi adotada nesta pesquisa. Assim, tanto para cálculos de ACV quanto de ACCV, os materiais quantificados no projeto estrutural, foram acrescidos das quantidades e custos estimados para quatro eventos de reparos realizados em intervalos de 10 anos, para cada uma das edificações, a partir dos resultados da VUe (Tabela 6.6), a fim de garantir o equivalente funcional  $VUP_{\min}$  igual a 50 anos (ABNT NBR 15575-1:2013) para todos os sistemas estruturais analisados.

### **6.3.3.3 Indicadores ambientais dos pavimentos-tipo**

A Tabela 6.7 mostra os resultados dos indicadores ambientais calculados com os dados de projeto mostrados na Tabela 5.1 e condições de exposição descritas no capítulo 5, divididos pela área estrutural do pavimento-tipo. As edificações de tipologia comercial (F, R, S, AB e AE) estão em negrito, assim como os resultados correspondentes às medianas de cada indicador.



**Tabela 6.7 - Resultados dos indicadores ambientais do pavimento-tipo dos estudos de caso**

PAVIMENTO-TIPO												
Material	Edificação	AP kgSO <sub>2</sub> eq/ m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> AE	EP kgPO <sub>4</sub> eq/ m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> AE	ODP kgCFC- 11 <sub>eq</sub> /m <sup>2</sup> AE	POCP kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/ m <sup>2</sup> AE	EGWP kgCO <sub>2</sub> eq/ m <sup>2</sup> AE	EE <sub>ren</sub> MJ/m <sup>2</sup> AE	EE <sub>n ren</sub> MJ/m <sup>2</sup> AE	NRC kg/m <sup>2</sup> AE	MC kg/m <sup>2</sup> AE	bWF m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/ m <sup>2</sup> AE	
CA	Ed A	0,097	0,016	9,94E-07	0,013	51,74	350,37	89,65	475,76	541,05	1,24	
CP	Ed B	0,072	0,013	6,90E-07	0,007	41,44	221,49	102,54	536,91	609,76	1,55	
CP	Ed C	0,068	0,013	7,20E-07	0,007	38,76	233,40	99,11	517,98	588,62	1,44	
CP	Ed D	0,144	0,023	1,25E-06	0,017	75,06	436,39	127,16	676,66	770,07	1,98	
CP	Ed E	0,138	0,022	1,24E-06	0,016	74,02	<b>424,57</b>	139,19	737,03	838,00	2,23	
CP	<b>Ed F</b>	0,134	0,021	1,23E-06	0,016	72,41	421,02	135,61	717,93	815,99	1,98	
CA	Ed G	0,119	0,021	1,35E-06	<b>0,016</b>	59,05	485,96	91,84	489,04	559,04	1,33	
CA	Ed H	0,113	0,020	1,27E-06	0,015	56,76	454,59	90,41	480,96	549,30	1,30	
CA	Ed I	0,145	0,024	1,53E-06	0,019	70,73	547,02	119,83	662,04	727,02	1,64	
CP	Ed J	0,106	0,019	1,07E-06	0,012	60,96	347,62	148,32	776,81	882,19	2,19	
CA	Ed k	0,147	0,020	1,21E-06	0,021	81,69	427,65	<b>124,88</b>	668,78	757,65	1,73	
CA	Ed L	0,165	0,025	1,58E-06	0,023	87,90	563,06	138,20	737,56	838,44	1,95	
CP	Ed M	0,186	0,029	1,66E-06	0,024	95,21	591,65	143,21	766,73	873,30	2,33	
CP	Ed N	0,168	0,026	1,48E-06	0,020	86,85	519,43	142,52	759,54	864,81	2,24	
CA	Ed O	0,189	0,025	1,51E-06	0,027	100,24	550,75	123,46	670,22	<b>760,58</b>	1,81	
CP	Ed P	0,208	0,030	1,62E-06	0,026	110,11	567,47	170,72	913,83	1038,3	2,67	
CA	Ed Q	0,154	0,024	1,50E-06	0,021	77,78	543,85	103,75	558,61	637,03	1,53	
CP	<b>Ed R</b>	0,150	0,024	1,30E-06	0,018	78,27	449,17	135,13	718,46	817,67	2,14	
CP	<b>Ed S</b>	0,166	0,025	1,48E-06	0,021	85,65	525,90	128,44	687,82	783,08	2,07	
CA	Ed T	0,119	0,020	1,28E-06	0,016	62,38	454,26	105,18	558,55	636,23	1,48	
CP	Ed U	0,128	0,021	1,12E-06	0,015	67,28	386,62	120,06	637,33	725,21	1,93	
CA	Ed V	0,147	0,020	<b>1,21E-06</b>	0,021	82,05	427,69	127,39	681,62	772,11	1,76	
CP	Ed X	<b>0,131</b>	0,021	1,18E-06	0,015	<b>69,11</b>	406,62	126,36	<b>669,83</b>	762,13	2,00	
CA	Ed Z	0,075	0,015	9,54E-07	0,009	42,55	323,79	101,61	531,36	604,17	1,34	
CP	Ed AA	0,086	0,016	8,94E-07	0,009	49,64	286,53	130,24	680,19	772,61	1,91	
CP	<b>Ed AB</b>	0,116	0,019	1,08E-06	0,014	62,35	369,18	119,53	636,22	718,78	1,82	
CP	Ed AC	0,130	<b>0,021</b>	1,16E-06	0,016	68,87	399,41	124,34	659,48	750,17	<b>1,89</b>	
CP	Ed AD	0,097	0,018	1,04E-06	0,010	55,04	339,70	137,62	719,73	817,83	2,07	
CP	<b>Ed AE</b>	0,115	0,019	1,10E-06	0,014	61,14	379,94	113,64	601,55	684,48	1,69	
CP	Ed AF	0,132	0,022	1,21E-06	0,015	69,97	412,76	132,35	700,45	796,89	2,13	
CP	EdAG	0,103	0,018	9,58E-07	0,011	55,23	320,48	116,19	611,93	696,42	1,73	

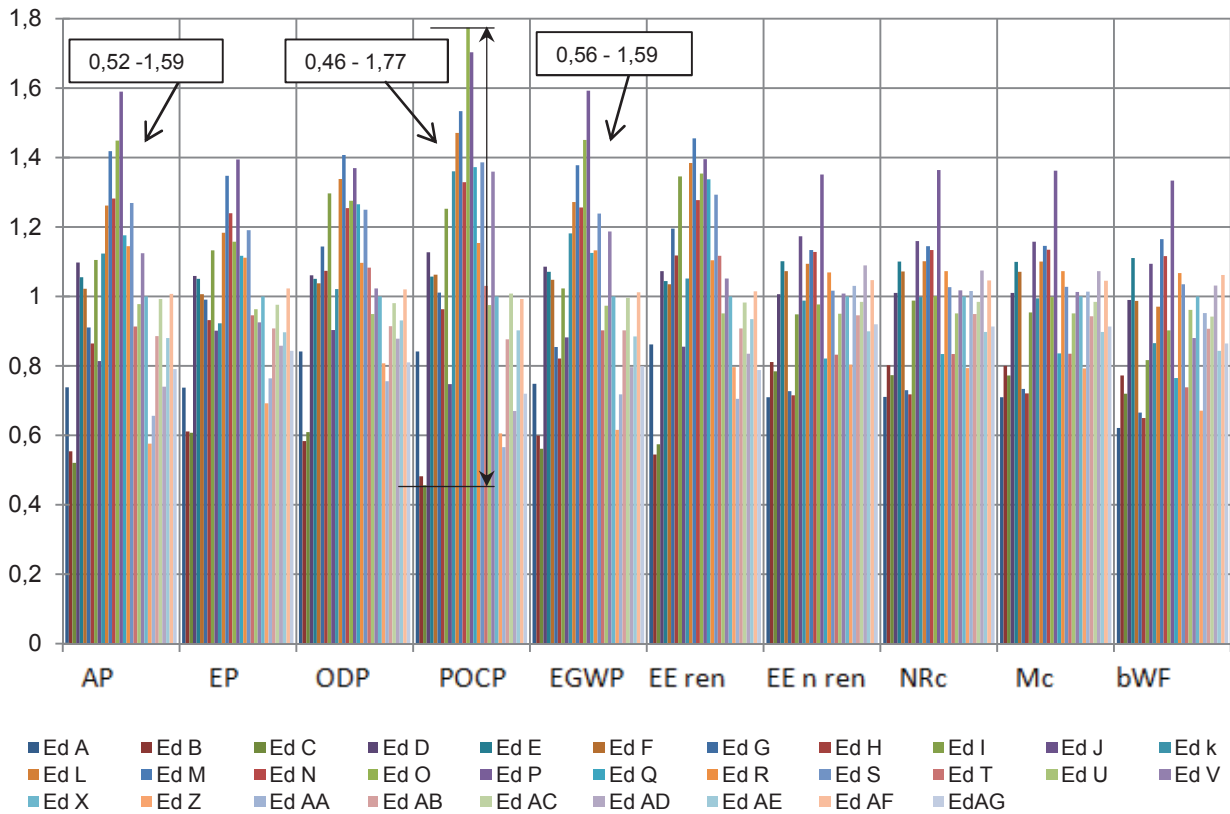
Os resultados da análise estatística referente aos valores dos indicadores ambientais são apresentados no Apêndice B. A Tabela 6.8 resume a análise estatística entre sistemas de pavimento-tipo em concreto armado e protendido, ao nível de significância de 5%. Os valores dos indicadores AP, ODP, EP, POCP, EGWP e  $EE_{ren}$  são estatisticamente iguais, enquanto que os valores dos indicadores *pegada de água azul* (bWF), *energia primária incorporada não renovável* ( $EE_{n,ren}$ ), *conteúdo não renovável* (NRC) e *consumo de materiais* (Mc) não são iguais estatisticamente, e apresentam medianas menores nos sistemas estruturais em concreto armado (Apêndice B).

**Tabela 6.8 – Resultados de p-valor e Mann-Whitney U para indicadores do pavimento-tipo dos grupos CA e CP (Stathsoft Statistica 10)**

Variável	Soma dos Postos CA	Soma dos Postos CP	U	p-valor
AP - $kgSO_{2eq} / m^2_{AE}$	189,0	307,0	97,0	0,61
EP - $kgPO_{4eq} / m^2_{AE}$	176,0	320,0	110,0	0,98
ODP - $kgCFC-11_{eq} / m^2_{AE}$	215,0	281,0	71,0	0,11
POCP - $kgC_2H_{4eq} / m^2_{AE}$	212,0	284,0	74,0	0,14
EGWP - $kgCO_{2e} / m^2_{AE}$	185,0	311,0	101,0	0,73
$EE_{ren}$ - $MJ / m^2_{AE}$	224,0	272,0	62,0	0,05
$EE_{n,ren}$ - $MJ / m^2_{AE}$	113,0	383,0	47,0	0,01
NRC - $kg / m^2_{AE}$	119,0	377,0	53,0	0,02
Mc - $kg / m^2_{AE}$	116,0	380,0	50,0	0,01
bWF - $m^3H_2O / m^2_{AE}$	90,0	406,0	24,0	0,00

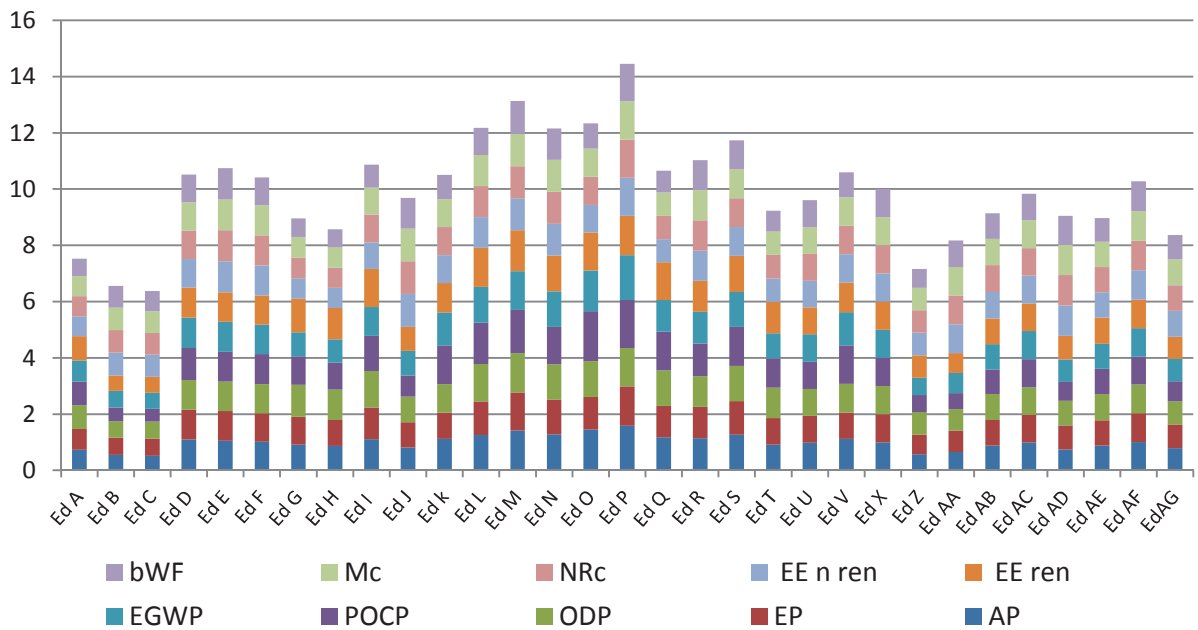
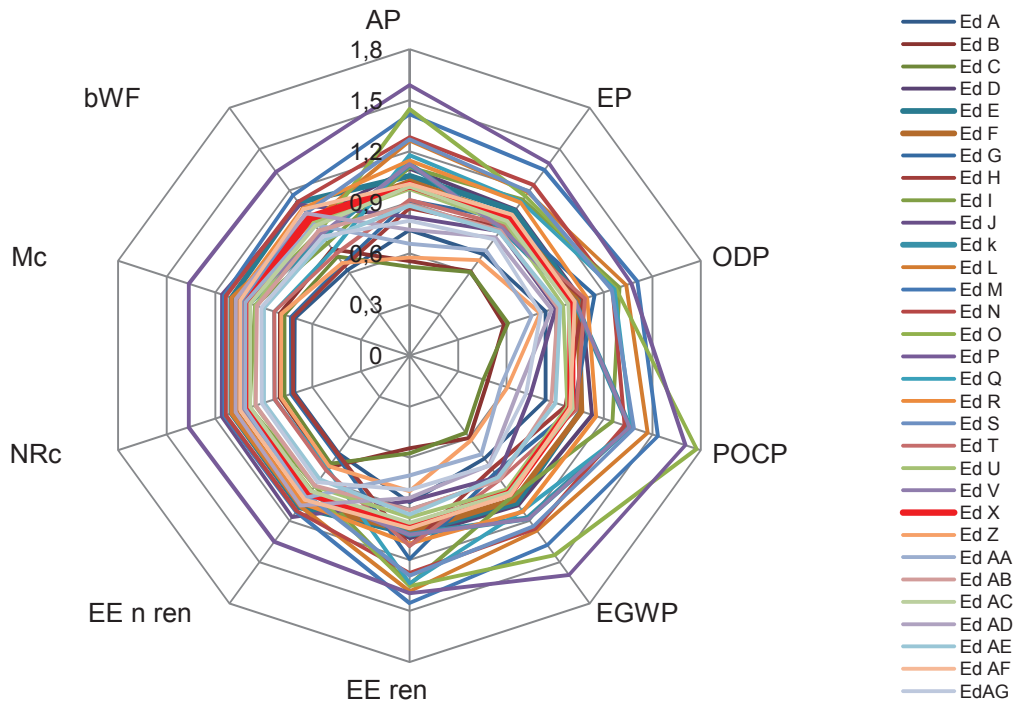
Para permitir uma análise comparativa entre os sistemas estruturais de todas as edificações, os indicadores foram normalizados em relação à Edificação X, tomada como referência, por representar o sistema estrutural cujo pavimento-tipo apresentou maior número de resultados de indicadores ambientais coincidentes com as medianas. A Figura 6.9 mostra os resultados da Tabela 6.7 normalizados, e portanto, adimensionais.

Na análise dos trinta e um estudos de caso, observa-se (Figura 6.9) que o indicador *potencial formação de ozônio fotoquímico* (POCP) apresentou maior variabilidade entre os sistemas estruturais, seguido dos indicadores *potencial de acidificação* (AP) e *potencial de aquecimento global* (EGWP).



**Figura 6.9 - Resultados dos indicadores ambientais dos pavimentos-tipo normalizados em relação ao sistema estrutural da Edificação X**

O perfil de desempenho ambiental dos pavimentos-tipo foi traçado a partir dos resultados destes dez indicadores (de aspectos e impactos) ambientais por unidade de área estrutural ( $m^2_{AE}$ ), normalizados em relação aos resultados da Ed X. Os resultados, adimensionais, são apresentados, sem nenhum tipo de ponderação, na Figura 6.10, com o gráfico tipo radar (quanto menor a área interna do polígono, melhor é o desempenho ambiental) e de colunas sobrepostas, para facilitar a visualização, em função do grande número de estudos de caso.



**Figura 6.10 - Resultados dos indicadores ambientais normalizados dos sistemas estruturais dos pavimentos-tipo**

As Figura 6.11 e Figura 6.12 apresentam os perfis ambientais específicos para as estruturas em concreto armado e protendido.

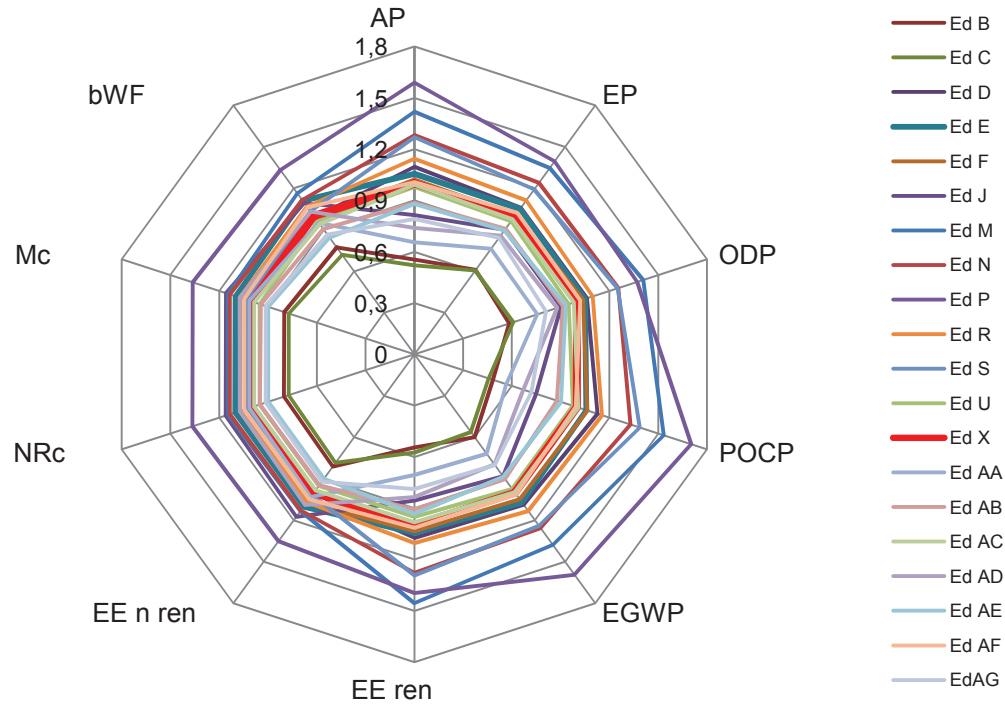


Figura 6.11 - Perfil de desempenho ambiental do pavimento-tipo das 20 (vinte) estruturas em concreto protendido

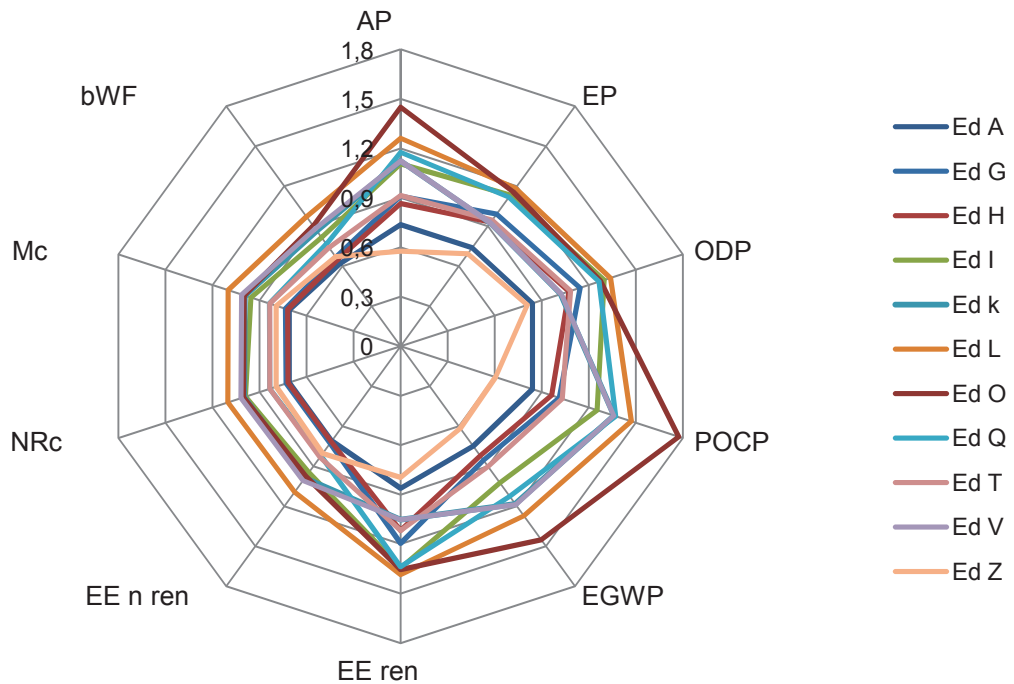


Figura 6.12 - Perfil de desempenho ambiental do pavimento-tipo das 11 (onze) estruturas em concreto armado

Nestas duas figuras, observa-se que as estruturas em concreto armado apresentam melhor desempenho ambiental para os indicadores bWF,  $EE_{n,ren}$ , NRC e Mc no nível do pavimento-tipo. Os indicadores, *Potencial formação de ozônio fotoquímico* (POCP), seguido do *potencial de acidificação* (AP), *potencial de aquecimento global* (EGWP) e *energia incorporada renovável* ( $EE_{ren}$ ), normalizados pelos correspondentes da Ed X, foram os mais variáveis ao conjunto composto pelos 31 casos (Figura 6.9), bem como, entre os grupos distintos formados por estruturas somente em concreto armado ou concreto protendido.

### 6.3.3.4 Indicadores ambientais da superestrutura

Analogamente ao que foi realizado para o pavimento-tipo, a Tabela 6.9 mostra os resultados dos indicadores ambientais calculados e divididos por  $m^2$  de área estrutural total ( $m^2_{AEtot}$ ) da superestrutura. Edificações comerciais estão em negrito, assim como os resultados correspondentes às medianas de cada indicador.

**Tabela 6.9 - Resultados dos indicadores ambientais da superestrutura dos estudos de caso**

SUPERESTRUTURA											
Material	Edificação	AP kgSO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	EP kgPO <sub>4</sub> eq/m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	ODP kgCFC-11 <sub>eq</sub> /m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	POCP kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	EGWP kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	EE <sub>ren</sub> MJ / m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	EE <sub>n ren</sub> MJ / m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	NRC kg / m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	Mc kg / m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>	bWF m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> <sub>AEtot</sub>
CA	Ed A	0,138	0,029	1,86E-06	0,017	61,20	676,62	89,38	475,34	548,76	1,38
CP	Ed B	0,158	0,031	1,83E-06	0,018	76,09	644,36	138,45	731,41	837,77	2,19
CP	Ed C	0,134	0,031	1,92E-06	0,014	59,45	678,24	119,50	626,25	721,40	1,88
CP	Ed D	<b>0,170</b>	0,032	1,87E-06	<b>0,020</b>	80,90	664,59	132,16	702,07	804,50	2,11
CP	Ed E	0,163	0,032	1,9E-06	0,018	78,12	670,04	138,54	732,74	839,53	2,27
CP	<b>Ed F</b>	0,128	0,026	1,55E-06	0,014	60,33	547,70	109,39	577,43	662,26	1,67
CA	Ed G	0,186	0,043	2,85E-06	0,022	75,67	1040,89	110,38	584,37	680,53	1,78
CA	Ed H	0,198	0,047	3,13E-06	0,023	76,19	1151,01	97,22	516,87	607,38	1,67
CA	Ed I	0,215	0,044	2,87E-06	0,027	90,69	1048,04	131,32	726,90	809,51	1,98
CP	Ed J	0,193	0,037	2,2E-06	0,023	91,17	785,40	146,84	780,18	894,92	2,37
CA	Ed k	0,173	0,029	1,84E-06	0,023	86,10	664,24	<b>123,71</b>	<b>662,22</b>	<b>756,46</b>	1,82
CA	Ed L	0,219	0,039	2,53E-06	0,029	104,53	918,06	147,40	788,46	904,05	2,21
CP	Ed M	0,215	0,038	2,35E-06	0,027	101,93	847,58	146,06	781,36	895,92	2,41
CP	Ed N	0,209	0,039	2,28E-06	0,024	97,41	819,20	144,78	772,79	887,39	2,41
CA	Ed O	0,193	0,030	1,85E-06	0,027	96,45	678,46	118,84	643,15	734,10	1,79
CP	Ed P	0,187	0,034	<b>1,98E-06</b>	0,022	89,18	<b>710,55</b>	135,88	724,76	830,50	2,18

**Tabela 6.9 - Resultados dos indicadores ambientais da superestrutura dos estudos de caso (cont.)**

SUPERESTRUTURA											
Material	Edificação	AP kgSO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	EP kgPO <sub>4</sub> eq/m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	ODP kgCFC-11 <sub>eq</sub> /m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	POCP kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	EGWP kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	EE <sub>ren</sub> <sup>2</sup> MJ / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	EE <sub>n ren</sub> <sup>2</sup> MJ / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	NRC kg / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	Mc kg / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	bWF m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>
CA	Ed Q	0,222	0,043	2,78E-06	0,028	98,27	1021,03	120,17	646,39	747,30	1,93
CP	Ed R	0,202	0,040	2,4E-06	0,023	90,75	864,14	138,04	734,56	846,21	2,29
CP	Ed S	0,184	<b>0,033</b>	2,02E-06	0,022	87,58	724,62	131,70	702,71	805,56	2,16
CA	Ed T	0,168	0,036	2,35E-06	0,020	<b>77,00</b>	844,67	131,39	693,59	798,12	<b>1,94</b>
CP	Ed U	0,154	0,029	1,7E-06	0,017	72,76	602,10	121,58	645,15	739,58	2,03
CA	Ed V	0,162	0,026	1,64E-06	0,022	84,04	586,98	127,97	683,54	778,59	1,83
CP	Ed X	0,163	0,034	2,09E-06	0,018	73,33	746,82	126,57	668,68	769,93	2,05
CA	Ed Z	0,169	0,037	2,44E-06	0,020	71,97	890,16	105,42	559,30	648,36	1,66
CP	Ed AA	0,154	0,031	1,88E-06	0,018	70,70	672,48	114,44	607,08	698,10	1,88
CP	Ed AB	0,175	0,037	2,29E-06	0,019	74,20	831,69	106,19	568,96	655,05	1,84
CP	Ed AC	0,154	0,029	1,73E-06	0,017	65,56	634,88	77,03	416,12	482,73	1,42
CP	Ed AD	0,174	0,037	2,27E-06	0,019	78,04	811,54	133,97	707,77	814,99	2,20
CP	Ed AE	0,144	0,031	1,89E-06	0,016	65,72	669,46	120,38	634,23	729,22	1,86
CP	Ed AF	0,156	0,031	1,89E-06	0,017	72,00	672,45	123,62	654,12	751,45	2,06
CP	EdAG	0,141	0,029	1,71E-06	0,015	64,86	603,26	119,39	629,69	723,46	1,90

A Tabela 6.10 resume a análise estatística e mostra que, ao nível de significância de 5%, os valores dos indicadores ambientais para os grupos CA e CP na superestrutura são estatisticamente iguais, à exceção de POCP, EE<sub>ren</sub> e bWF.

**Tabela 6.10 – Resultados do p-valor e Mann-Whitney U para indicadores da superestrutura dos grupos CA e CP (Stathsoft Statistica 10)**

Variável	Soma dos Postos		U	p-valor
	CA	CP		
AP - kgSO <sub>2</sub> eq / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	220,0	276,0	66,0	0,07
EP - kgPO <sub>4</sub> eq / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	203,0	293,0	83,0	0,27
ODP - kgCFC-11eq / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	221,0	275,0	65,0	0,07
POCP - kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	241,0	255,0	45,0	<b>0,01</b>
EGWP - kgCO <sub>2</sub> eq / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	207,0	289,0	79,0	0,21
EE <sub>ren</sub> - MJ / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	231,0	265,0	55,0	<b>0,02</b>
EE <sub>n ren</sub> - MJ / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	141,0	355,0	75,0	0,15
NRC - kg / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	150,0	346,0	84,0	0,29
Mc - kg / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	148,0	348,0	82,0	0,26
bWF - m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O / m <sup>2</sup> AE <sub>tot</sub>	113,0	383,0	47,0	<b>0,01</b>

Na comparação do desempenho ambiental da superestrutura entre os grupos CA e CP, vale destacar a maior variabilidade e pior desempenho apontado pelos indicadores POCP,  $EE_{ren}$ , do grupo CA, enquanto o indicador bWF teve a menor variabilidade e melhores resultados neste grupo, conforme apresentado nas Figura B.8 e Figura B.9 do Apêndice B.

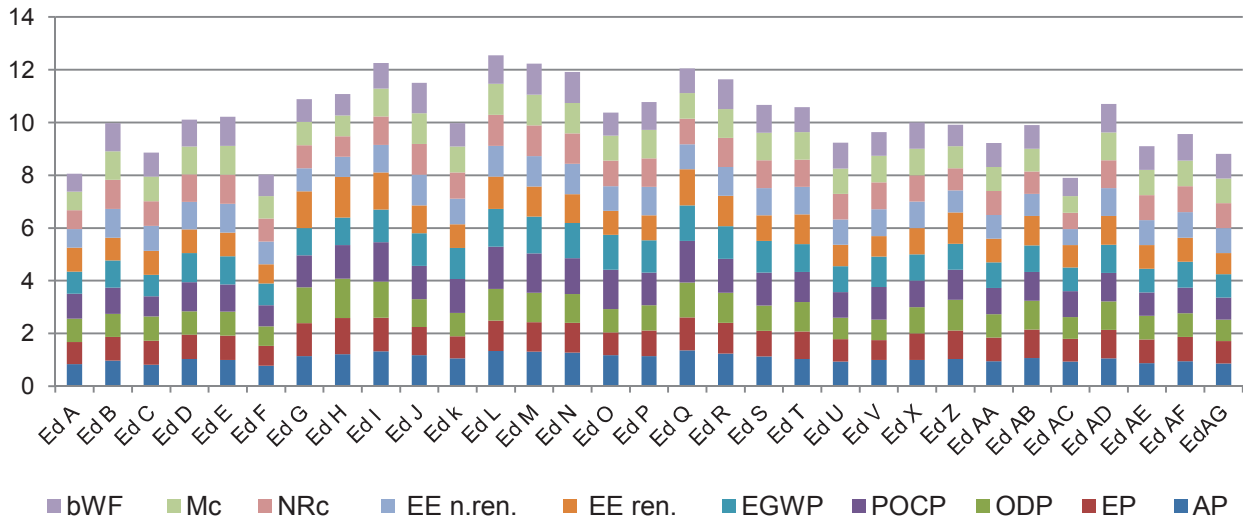
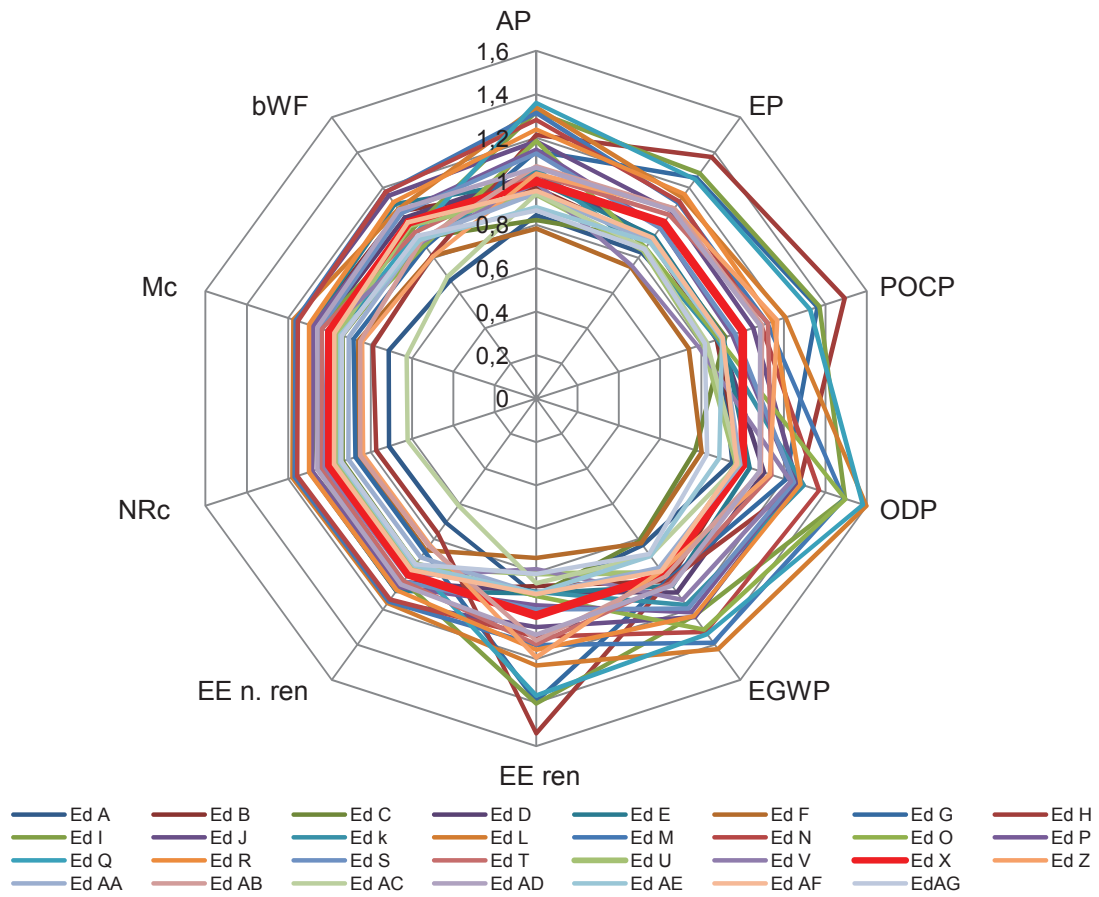
Comparando valores dos indicadores para superestrutura e pavimento-tipo, os resultados do p-valor indicados na Tabela 6.11 mostram que apenas os valores dos indicadores *energia incorporada não renovável* ( $EE_{n,ren}$ ), *conteúdo não renovável* (NRc) e *consumo de recursos materiais* (Mc) são estatisticamente iguais, ao nível de significância de 5%.

**Tabela 6.11 - Comparação entre resultados dos indicadores ambientais da superestrutura e do pavimento-tipo (Stathsoft Statistica 10)**

Variável	N	T	Z	p-valor
AP - $kgSO_2eq / m^2AE_{tot}$	31	7,00	4,72	0,000002
EP - $kgPO_4eq / m^2AE_{tot}$	31	0,00	4,86	0,000001
ODP - $kgCFC-11eq / m^2AE_{tot}$	31	0,00	4,86	0,000001
POCP - $kgC_2H_4eq / m^2AE_{tot}$	31	24,00	4,39	0,000011
EGWP - $kgCO_2eq / m^2AE_{tot}$	31	52,00	3,84	0,000123
$EE_{ren}$ - $MJ / m^2AE_{tot}$	31	0,00	4,86	0,000001
$EE_{n,ren}$ - $MJ / m^2AE_{tot}$	31	197,00	1,00	0,317590
NRc - $kg / m^2AE_{tot}$	31	189,00	1,16	0,247602
Mc - $kg / m^2AE_{tot}$	31	163,00	1,67	0,095773
bWF - $m^3H_2O / m^2AE_{tot}$	31	90,00	3,10	0,001960

O perfil de desempenho ambiental das superestruturas foi traçado a partir dos resultados destes dez indicadores (de aspectos e impactos) ambientais por unidade de área estrutural total da superestrutura ( $m^2_{AE_{tot}}$ ) e normalizados pela Ed. X. Desta forma, os resultados adimensionais das superestruturas são apresentados, sem nenhum tipo de ponderação, na Figura 6.13, com gráficos tipo radar e também em gráfico de colunas sobrepostas, para facilitar a visualização, em função do grande número de estudos de caso.

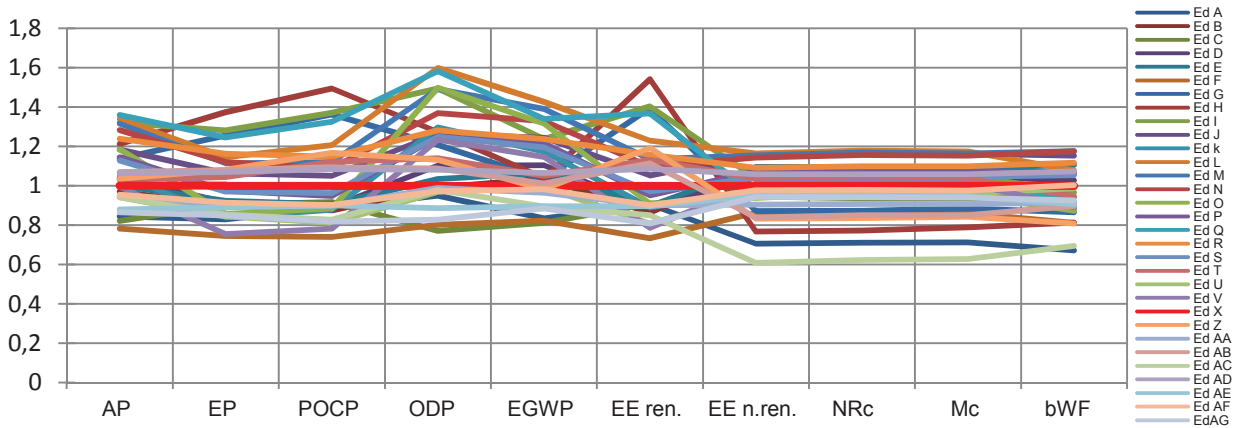




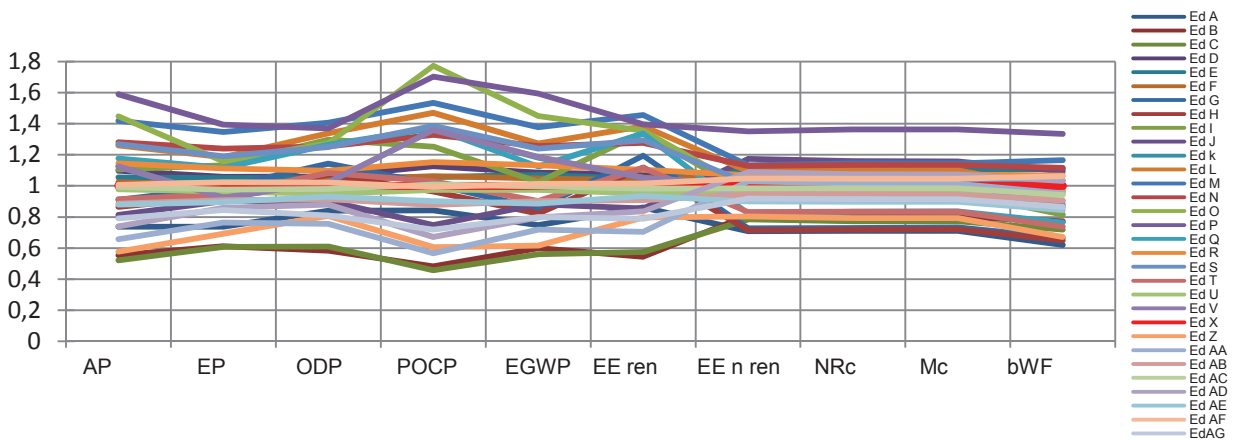
**Figura 6.13 - Perfil de desempenho ambiental das 31 superestruturas: valores normalizados dos indicadores ambientais**

Numa comparação com o perfil de desempenho dos pavimentos-tipo, embora se observe na Figura 6.14 alguma similaridade no comportamento dos valores dos indicadores entre ambas as

escalas, à exceção de Mc, NRc e  $EE_{n-ren}$ , os valores obtidos nelas não são estatisticamente iguais. Portanto, com relação ao *desempenho ambiental* de sistemas estruturais em concreto, não se pode considerar o pavimento-tipo como representativo de toda a superestrutura.



a) Valores normalizados dos indicadores ambientais das superestruturas



b) Valores normalizados dos indicadores ambientais dos pavimentos-tipo

**Figura 6.14 - Tendências dos valores dos indicadores ambientais da superestrutura e dos pavimentos-tipo dos estudos de caso**

Percebe-se que os indicadores Mc e NRc se comportam similarmente e possuem mesma ordem de grandeza, tanto quando calculado no nível do pavimento-tipo, quanto no da superestrutura. No entanto, o indicador NRc não contempla o consumo de fôrmas em madeira compensada, que pode ser um componente importante do consumo total de materiais de sistemas estruturais em concreto. Como nos casos estudados as estruturas foram todas moldadas *in loco*, a lógica que governou o consumo de fôrmas entre os diferentes tipos de lajes foi similar. Para estruturas em lajes pré-fabricadas, o uso de fôrmas metálicas, com alto reaproveitamento, possivelmente mostraria uma tendência diferente.

Analisando, a seguir, o posicionamento dos resultados nacionais obtidos nesta pesquisa, em relação aos dados de literatura internacional, foi realizada uma tentativa de comparação com os resultados publicados no relatório final do projeto *Piloting SBA common metrics* (HANS et al., (2012), *vide* Quadro 1.3, capítulo 1) sobre um conjunto comum de indicadores de sustentabilidade ambiental para avaliação de edificações aplicados a estudos de caso residenciais e/ou comerciais na Alemanha, Espanha, Finlândia, França, EUA e República Tcheca.

O conjunto proposto na primeira fase do projeto era composto pelos indicadores *potencial de aquecimento global* (GWP) que corresponde ao *carbono equivalente incorporado e operacional*; *consumo de Energia primária não renovável* ( $EE_{n\ ren}$ ) incorporada e operacional, *consumo de água* (WF) *incorporada* (Pegada de água azul) e operacional; *produção de resíduos sólidos* (técnico e operacional); e *qualidade do ar interno*: conforto térmico, concentração de  $CO_2$  e de formaldeído no ambiente.

Os pesquisadores verificaram a viabilidade técnica de cálculo dos indicadores, utilizando dados e ferramentas de avaliação de cada país, sendo alguns valores obtidos e as dificuldades registradas. Os indicadores efetivamente calculados variaram em função das ferramentas disponíveis, englobando EGWP, POCP, ODP, EP, AP e  $EE_{n\ ren}$ , que são indicadores comuns aos calculados nesta pesquisa.

Deve-se ressaltar, porém, as inúmeras questões que comprometem a comparabilidade entre resultados de pesquisas deste tipo. Entretanto, numa tentativa de comparação, os valores correspondentes ao sistema estrutural foram extraídos dos resultados dos estudos de caso apresentados por Hans e outros (2012). Percebeu-se que não há equivalência funcional entre os estudos de caso, que possuem vida útil de 50, 60 e 100 anos, comprometendo a análise. Considerando apenas os resultados para VUP de 50 anos<sup>4</sup>, observa-se que a mediana dos valores de EGWP para os sistemas estruturais nacionais, ( $77,06\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2_{\text{AE}}$ ), nas condições deste estudo, é cerca de 4 (quatro) vezes menor que os resultados encontrados nas estruturas em concreto armado da Alemanha ( $327\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2_{\text{NFA}}$ ) e República Tcheca ( $317\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2_{\text{NFA}}$ ).

A diferença grande observada entre o carbono equivalente incorporado das estruturas de concreto brasileiras e dos países envolvidos no projeto, justifica-se, dentre outras razões, (i) pelo fato de se explorar em países de clima frio e temperado, a elevada massa térmica do concreto (HACKER et

<sup>4</sup> Para VUP de 60 e 100 anos, ainda que se multiplique resultados anuais dos indicadores por 50 anos para analisar comparativamente, o dimensionamento estrutural é função da VUP originalmente adotada em cada estudo de caso e interfere na análise.

al, 2008; NIELSEN, 2008; JACOBS, 2009; REYNDERS et al., 2013), por meio de espessuras maiores e peças mais robustas, promovendo isolamento térmico e minimizando o consumo de energia operacional; e pelas diferenças entre (ii) métodos de cálculo, (iii) limites do sistema considerados nas ACV, (iv) processos produtivos dos materiais, incluindo as diferenças entre matrizes energéticas dos países, (v) códigos estruturais, (vi) equivalência funcional na normalização (área útil total de piso (NFA) considerada nos referidos estudos de caso, versus área estrutural (AE), utilizada nesta tese).

Calculando-se a massa por unidade de área do sistema estrutural chega-se a  $1904 \text{ kg/m}^2_{\text{NFA}}$  para República Tcheca, e  $1391 \text{ kg/m}^2_{\text{NFA}}$  para a Alemanha, enquanto a massa por unidade de área estrutural dos estudos de caso desta tese é igual a  $532 \text{ kg/m}^2_{\text{AE}}$  (mediana). Isto confirma as justificativas elencadas no parágrafo anterior (i), (v) e, caso a área útil seja menor que a área estrutural, (vi).

Quanto à comparação entre os resultados dos indicadores, verificou-se, de fato, seu comprometimento pelas razões já expostas, como por exemplo, no estudo de caso alemão, as ACV foram consideradas do berço ao túmulo e os resultados de todos os indicadores foram calculados com majoração de 10% em todos os estágios do ciclo de vida da construção. Este fator foi aplicado para compensar o fato de não estarem incluídas no cálculo, todas as partes da edificação. Para a República Tcheca, as ACV do berço ao portão desconsideraram o transporte da fábrica ao canteiro, tal como nesta tese. Resultados da Alemanha e República Tcheca referentes à energia primária não renovável, englobaram energia incorporada e operacional.

Estes mesmos indicadores foram utilizados por Muller e outros (2013) para comparar o desempenho ambiental de estruturas de concreto de altíssimo-desempenho (UHPC) e estruturas de concreto de resistência e desempenho normais (NPC), de projetos de estruturas orientados à durabilidade. Os resultados apontaram o melhor desempenho ambiental da estrutura em UHPC, quando normalizados por parâmetros de durabilidade (permeabilidade, resistência a ataques químicos) e de resistência do concreto.

A pesquisa de Purnell (2011) (vide capítulo 3, item 3.2), por sua vez, evidenciou o cuidado a ser tomado na definição da unidade funcional, que deve exprimir a função do elemento estrutural para comparar desempenho de sistemas estruturais e sugeriu que unidades funcionais adequadas às vigas e pilares seriam função da capacidade de carga e dimensão relevante.

A apresentação dos resultados dos indicadores por  $m^2$  de área estrutural utilizada neste trabalho, para 50 anos de VUP, e uso residencial e comercial, consegue capturar aspectos de durabilidade e função estrutural, aliada à facilidade de coleta de dados nos escritórios de projeto e de realização de análises comparativas entre diferentes estruturas de edificações de mesma tipologia.

No âmbito de pesquisas nacionais, destaca-se os estudos desenvolvidos por pesquisadores da UNICAMP e UFES, dentro do Projeto de P&D CPFL *Green Building: Tecnologias Verdes* (PA00017), para quatro edificações completas, consideradas de tipologia comercial, todos com até três pavimentos, em que se constatou aumentos da ordem de 20 a 40% ao se considerar as emissões dos demais GEE ( $ECO_{2e}$ ) além do  $CO_2$ , em alguns materiais, tais como, madeira serrada e aço CA-50 (SILVA; SILVA, 2013). Os resultados de EGWP e  $EE_{total}$  referentes às superestruturas dessas edificações em concreto armado, com  $f_{ck}30MPa$  e cimento CPIII-32 foram  $49,21 kgCO_{2e}/m^2$  e  $351,97 MJ/m^2$ , respectivamente. A área referida é a total construída e a vida útil de projeto não foi informada (SILVA; SILVA, 2013).

Se considerada VUP de 50 anos, e assumido – com base na prática de projeto, que a área construída seja cerca de 5% maior que a área estrutural, pode-se compará-los aos resultados das superestruturas das edificações de tipologia comercial aqui obtidos. As medianas destes indicadores para os 5 sistemas estruturais nessas condições, com alturas variando de 17 a 30 pavimentos foram  $74,20 kgCO_{2e}/m^2_{AE}$  e  $845 MJ/m^2_{AE}$ . Por unidade de área construída, os valores comparáveis ( $70,67 kgCO_{2e}/m^2$  e  $804,76 MJ/m^2$ ) mostram que o EGWP e a energia incorporada total ( $EE_{ren}+EE_{nren}$ ) foram cerca de 1,4 e 2,3 vezes maiores que os resultados apontados por Silva e Silva (2013) para as estruturas em concreto de edificações de tipologia semelhante, com até 3 pavimentos.

Destaca-se que apesar de se tratar de edificações na mesma região, matriz energética, e normas de dimensionamento e de práticas construtivas semelhantes, além de não haver diferença significativa entre variação cronológica, funcional, e de contabilização, as razões para estas discrepâncias provavelmente recaem no número de pavimentos, classe de agressividade ambiental e padrão de qualidade da construção.

### **6.3.3.5 Ponderação dos indicadores ambientais**

#### **6.3.3.5.1 Resultados da ponderação de indicadores dos pavimentos-tipo**

Aplicando-se os dois cenários de ponderação (Tabela 5.5, Capítulo 5) aos resultados dos

indicadores de desempenho ambiental dos pavimentos-tipo dos estudos de caso (Tabela 6.7) normalizados por Ed.X, chega-se aos desempenhos ambientais ponderados indicados na Tabela 6.12 e Tabela 6.13. Os valores em negrito indicam o melhor e o pior resultado encontrados para o desempenho ambiental ponderado pelo cenário A1 (adaptação do *Eco-Indicator 99*) e a edificação X utilizada para normalização.

**Tabela 6.12 - Resultados de desempenho ambiental ponderado dos pavimentos-tipo de valores normalizados (adimensionais) de indicadores – cenário A1 ( Eco-indicator 99)**

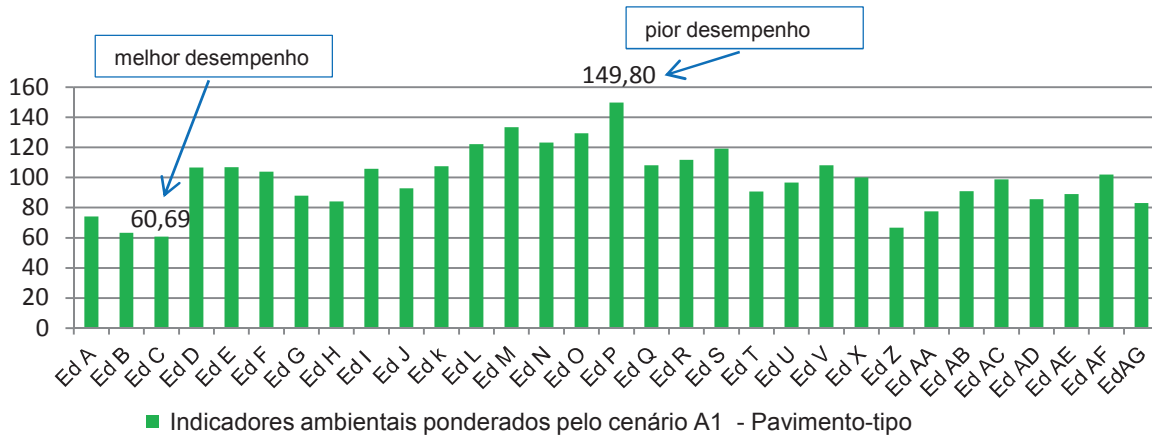
Edificação	Valores normalizados e ponderados de indicadores ambientais - PAVIMENTO-TIPO										Desempenho ambiental global
	AP	EP	ODP	POCP	EGWP	EE <sub>ren</sub>	EE <sub>n.ren</sub>	NRc	Mc	bWF	
Ed.A	14,76	14,75	2,89	0,96	26,52	0,086	13,91	0,0710	0,0710	0,0621	74,08
Ed.B	11,08	12,22	2,00	0,55	21,24	0,054	15,91	0,0802	0,0800	0,0772	63,30
Ed.C	10,41	12,14	2,09	0,52	19,87	0,057	15,37	0,0773	0,0772	0,0720	<b>60,69</b>
Ed.D	21,95	21,19	3,64	1,29	38,48	0,107	19,72	0,1010	0,1010	0,0990	106,67
Ed.E	21,11	21,01	3,60	1,21	37,95	0,104	21,59	0,1100	0,1100	0,1111	106,90
Ed.F	20,45	20,13	3,56	1,21	37,12	0,104	21,03	0,1072	0,1071	0,0987	103,93
Ed.G	18,22	19,82	3,92	1,15	30,27	0,120	14,25	0,0730	0,0734	0,0666	87,97
Ed.H	17,29	18,63	3,68	1,10	29,10	0,112	14,02	0,0718	0,0721	0,0649	84,14
Ed.I	22,11	22,66	4,45	1,43	36,26	0,135	18,59	0,0988	0,0954	0,0816	105,90
Ed.J	16,28	18,02	3,10	0,85	31,25	0,085	23,01	0,1160	0,1158	0,1095	92,94
Ed.K	22,48	18,46	3,50	1,55	41,88	0,105	19,37	0,0998	0,0994	0,0866	107,63
Ed.L	25,23	23,68	4,59	1,68	45,06	0,138	21,44	0,1101	0,1100	0,0971	122,13
Ed.M	28,38	26,95	4,83	1,75	48,81	0,146	22,21	0,1145	0,1146	0,1165	133,41
Ed.N	25,63	24,79	4,30	1,52	44,52	0,128	22,11	0,1134	0,1135	0,1116	123,34
Ed.O	28,97	23,16	4,37	2,02	51,39	0,135	19,15	0,1001	0,0998	0,0902	129,49
Ed.P	31,79	27,90	4,70	1,94	56,44	0,140	26,48	0,1364	0,1362	0,1334	<b>149,80</b>
Ed.Q	23,53	22,34	4,34	1,56	39,87	0,134	16,09	0,0834	0,0836	0,0765	108,12
Ed.R	22,89	22,24	3,76	1,32	40,12	0,110	20,96	0,1073	0,1073	0,1067	111,72
Ed.S	25,38	23,82	4,29	1,58	43,90	0,129	19,92	0,1027	0,1027	0,1035	119,33
Ed.T	18,27	18,91	3,72	1,17	31,98	0,112	16,32	0,0834	0,0835	0,0738	90,71
Ed.U	19,56	19,27	3,26	1,11	34,49	0,095	18,62	0,0951	0,0952	0,0962	96,70
Ed.V	22,48	18,50	3,51	1,55	42,06	0,105	19,76	0,1018	0,1013	0,0880	108,27
<b>Ed.X</b>	<b>20,00</b>	<b>20,00</b>	<b>3,43</b>	<b>1,14</b>	<b>35,43</b>	<b>0,100</b>	<b>19,60</b>	<b>0,1000</b>	<b>0,1000</b>	<b>0,1000</b>	<b>100,00</b>
Ed.Z	11,53	13,85	2,77	0,69	21,81	0,080	15,76	0,0793	0,0793	0,0671	66,71
Ed.AA	13,12	15,27	2,59	0,65	25,44	0,070	20,20	0,1015	0,1014	0,0952	77,65
Ed.AB	17,72	18,16	3,14	1,00	31,96	0,091	18,54	0,0950	0,0943	0,0907	90,89
Ed.AC	19,85	19,52	3,36	1,15	35,30	0,098	19,29	0,0985	0,0984	0,0942	98,86
Ed.AD	14,80	17,17	3,01	0,76	28,21	0,084	21,35	0,1075	0,1073	0,1032	85,70
Ed.AE	17,61	17,93	3,19	1,03	31,34	0,093	17,63	0,0898	0,0898	0,0844	89,09
Ed.AF	20,15	20,47	3,50	1,13	35,87	0,102	20,53	0,1046	0,1046	0,1062	102,06
Ed.AG	15,83	16,87	2,78	0,82	28,31	0,079	18,02	0,0914	0,0914	0,0865	82,98

**Tabela 6.13 - Resultados de desempenho ambiental ponderado dos pavimentos-tipo de valores normalizados (adimensionais) de indicadores – cenário A2 (ponderação com pesos iguais)**

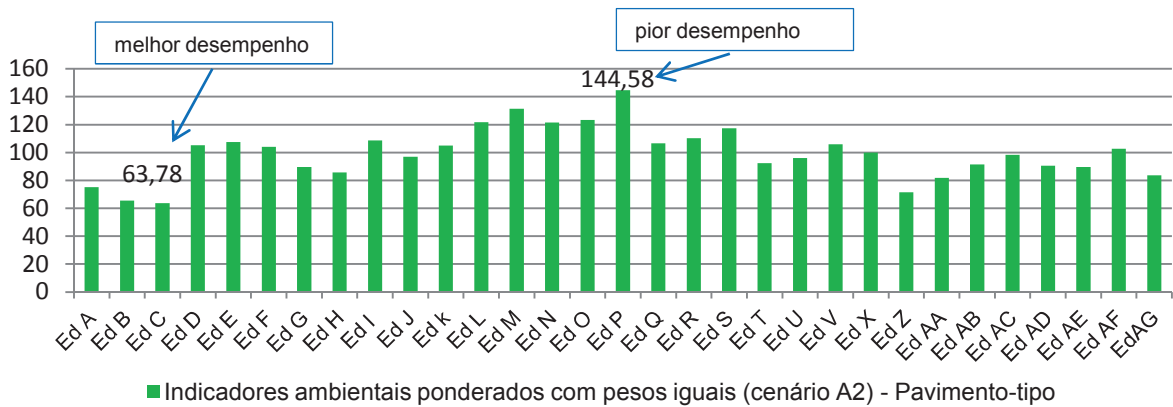
Edificação	Valores normalizados e ponderados de indicadores ambientais - PAVIMENTO-TIPO										Desempenho ambiental global
	AP	EP	ODP	POCP	EGWP	EE <sub>ren</sub>	EE <sub>n.ren</sub>	NRc	Mc	bWF	
Ed.A	7,38	7,38	8,41	8,41	7,49	8,62	7,09	7,10	7,10	6,21	75,19
Ed.B	5,54	6,11	5,84	4,82	6,00	5,45	8,11	8,02	8,00	7,72	65,61
Ed.C	5,20	6,07	6,09	4,57	5,61	5,74	7,84	7,73	7,72	7,20	<b>63,78</b>
Ed.D	10,97	10,59	10,61	11,27	10,86	10,73	10,06	10,10	10,10	9,90	105,21
Ed.E	10,55	10,51	10,51	10,57	10,71	10,44	11,02	11,00	11,00	11,11	107,42
Ed.F	10,23	10,07	10,38	10,63	10,48	10,35	10,73	10,72	10,71	9,87	104,16
Ed.G	9,11	9,91	11,44	10,12	8,54	11,95	7,27	7,30	7,34	6,66	89,63
Ed.H	8,65	9,32	10,73	9,63	8,21	11,18	7,15	7,18	7,21	6,49	85,75
Ed.I	11,06	11,33	12,97	12,53	10,23	13,45	9,48	9,88	9,54	8,16	108,64
Ed.J	8,14	9,01	9,03	7,48	8,82	8,55	11,74	11,60	11,58	10,95	96,89
Ed.K	11,24	9,23	10,21	13,61	11,82	10,52	9,88	9,98	9,94	8,66	105,09
Ed.L	12,61	11,84	13,38	14,71	12,72	13,85	10,94	11,01	11,00	9,71	121,77
Ed.M	14,19	13,47	14,07	15,34	13,78	14,55	11,33	11,45	11,46	11,65	131,28
Ed.N	12,82	12,39	12,54	13,29	12,57	12,77	11,28	11,34	11,35	11,16	121,52
Ed.O	14,49	11,58	12,75	17,74	14,50	13,54	9,77	10,01	9,98	9,02	123,39
Ed.P	15,90	13,95	13,70	17,04	15,93	13,96	13,51	13,64	13,62	13,34	<b>144,58</b>
Ed.Q	11,76	11,17	12,65	13,72	11,25	13,37	8,21	8,34	8,36	7,65	106,49
Ed.R	11,44	11,12	10,97	11,54	11,32	11,05	10,69	10,73	10,73	10,67	110,27
Ed.S	12,69	11,91	12,50	13,86	12,39	12,93	10,16	10,27	10,27	10,35	117,35
Ed.T	9,13	9,45	10,83	10,30	9,03	11,17	8,32	8,34	8,35	7,38	92,31
Ed.U	9,78	9,63	9,49	9,75	9,73	9,51	9,50	9,51	9,52	9,62	96,05
Ed.V	11,24	9,25	10,24	13,60	11,87	10,52	10,08	10,18	10,13	8,80	105,91
<b>Ed.X</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>100,00</b>
Ed.Z	5,76	6,92	8,08	6,05	6,16	7,96	8,04	7,93	7,93	6,71	71,55
Ed.AA	6,56	7,64	7,56	5,66	7,18	7,05	10,31	10,15	10,14	9,52	81,77
Ed.AB	8,86	9,08	9,15	8,77	9,02	9,08	9,46	9,50	9,43	9,07	91,41
Ed.AC	9,92	9,76	9,81	10,09	9,96	9,82	9,84	9,85	9,84	9,42	98,31
Ed.AD	7,40	8,58	8,79	6,70	7,96	8,35	10,89	10,75	10,73	10,32	90,47
Ed.AE	8,80	8,97	9,31	9,03	8,85	9,34	8,99	8,98	8,98	8,44	89,69
Ed.AF	10,07	10,23	10,21	9,93	10,12	10,15	10,47	10,46	10,46	10,62	102,72
Ed.AG	7,91	8,44	8,10	7,20	7,99	7,88	9,19	9,14	9,14	8,65	83,64



Representado graficamente na Figura 6.15 e Figura 6.16, o sistema estrutural da edificação C apresentou o melhor desempenho ambiental global, independentemente do cenário de ponderação dos indicadores calculados para pavimento-tipo.



**Figura 6.15 - Desempenho ambiental global dos pavimentos-tipo das edificações, expresso em um resultado único obtido pelo somatório dos indicadores ambientais ponderados pelo cenário A1 (adaptado do Eco-Indicator 99)**



**Figura 6.16 - Desempenho ambiental global dos pavimentos-tipo das edificações, expresso em um resultado único obtido pelo somatório dos indicadores ambientais ponderados pelo cenário A2 (pesos iguais)**

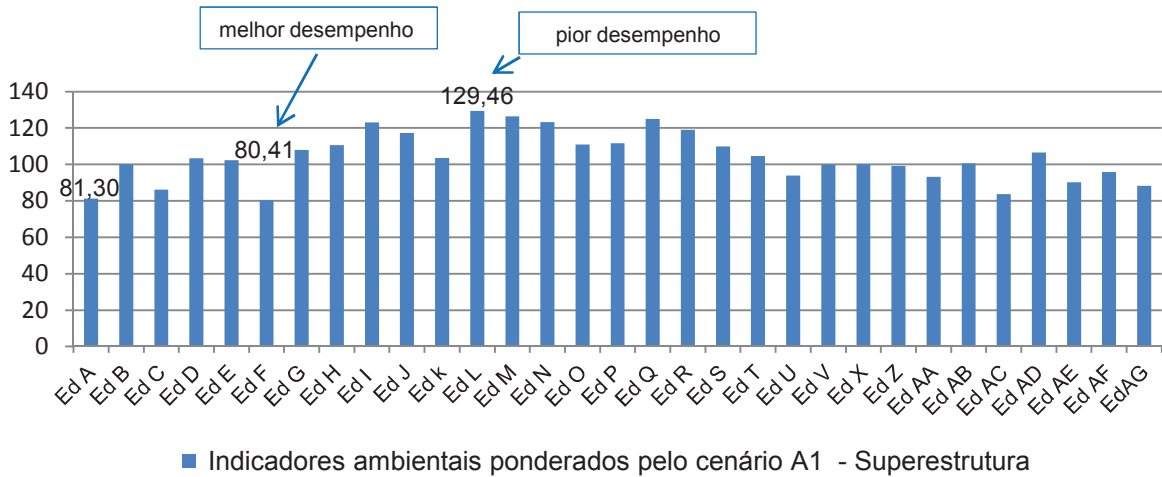
6.3.3.5.2 Resultados da ponderação de indicadores das superestruturas

De modo análogo, para as superestruturas dos estudos de caso (Tabela 6.9), chega-se ao desempenho ambiental global, obtido segundo dois cenários de ponderação (Tabela 6.14, Figura 6.17 e Figura 6.18).

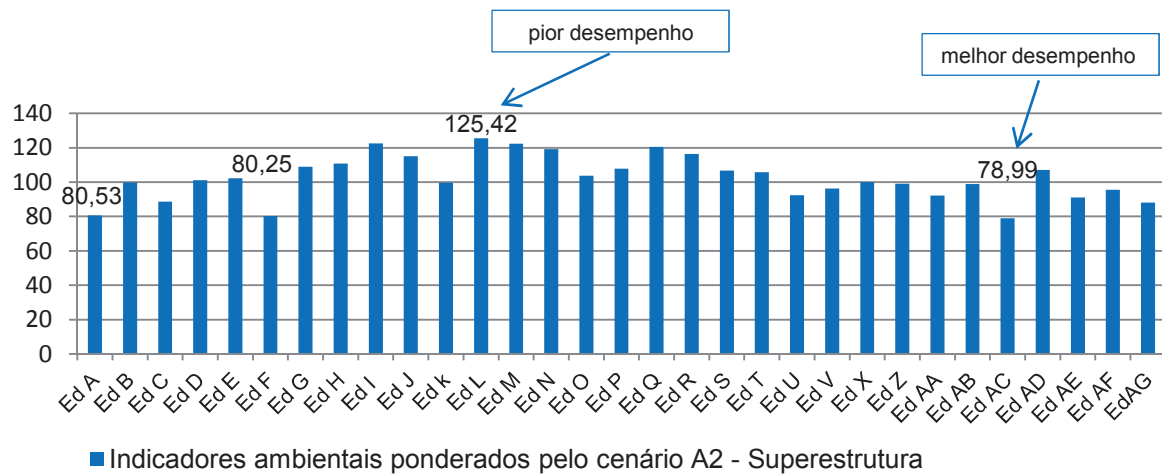
**Tabela 6.14 - Somatório dos indicadores das superestruturas após normalização e ponderação de acordo com dois cenários**

Desempenho ambiental global ponderado das superestruturas			
Edificação	Sistema estrutural	Cenário A1 (adaptação do <i>Eco-indicator 99</i> )	Cenário A2 (pesos iguais)
Ed A	CA	81,30	80,53
Ed B	CP	100,12	99,75
Ed C	CP	86,13	88,63
Ed D	CP	103,36	101,10
Ed E	CP	102,39	102,13
Ed F	CP	<b>80,41</b>	80,25
Ed G	CA	107,97	108,84
Ed H	CA	110,59	110,79
Ed I	CA	123,02	122,48
Ed J	CP	117,25	114,99
Ed k	CA	103,59	99,69
Ed L	CA	<b>129,46</b>	<b>125,42</b>
Ed M	CP	126,46	122,28
Ed N	CP	123,30	119,14
Ed O	CA	110,96	103,75
Ed P	CP	111,60	107,78
Ed Q	CA	124,99	120,49
Ed R	CP	119,09	116,29
Ed S	CP	109,82	106,67
Ed T	CA	104,62	105,76
Ed U	CP	93,93	92,36
Ed V	CA	99,84	96,32
Ed X	<b>CP</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
Ed Z	CA	99,10	99,08
Ed AA	CP	93,29	92,25
Ed AB	CP	100,65	98,95
Ed AC	CP	83,76	<b>78,99</b>
Ed AD	CP	106,48	106,99
Ed AE	CP	90,28	91,02
Ed AF	CP	95,90	95,60
EdAG	CP	88,22	88,03

Os dois cenários de ponderação apresentam tendências semelhantes. Não obstante os sistemas em concreto protendido tenham apresentado melhor desempenho ambiental também no nível da superestrutura para ambos os cenários de ponderação, o melhor desempenho coube a diferentes edificações entre os cenários A1 e A2, quais sejam, Ed.F e Ed.AC, respectivamente.



**Figura 6.17 - Desempenho ambiental global das superestruturas das edificações obtido pelo somatório dos indicadores ambientais ponderados de acordo com o cenário A1 (adaptado do Eco-Indicator 99)**



**Figura 6.18 - Desempenho ambiental global das superestruturas das edificações, obtido pelo somatório dos indicadores ambientais ponderados de acordo com o cenário A2 (pesos iguais)**

### 6.3.3.6 Equivalência de desempenho ambiental dos sistemas estruturais das tipologias comercial e residencial

Do elenco de estudos de caso, as Figura 6.19, Figura 6.20 e Figura 6.21 mostram, separadamente, o perfil de desempenho ambiental referente às tipologias comercial e residencial. Os resultados dos indicadores confirmam a premissa inicial de que não há diferença no sistema estrutural ou seu desempenho ambiental, entre as referidas tipologias. No grupo de CP, os valores dos indicadores das cinco estruturas para tipologia comercial (Figura 6.20) estão dentro do intervalo de resultados das quinze estruturas para tipologia residencial (Figura 6.21), e os indicadores apresentaram as mesmas tendências entre as duas tipologias (Figura 6.19).

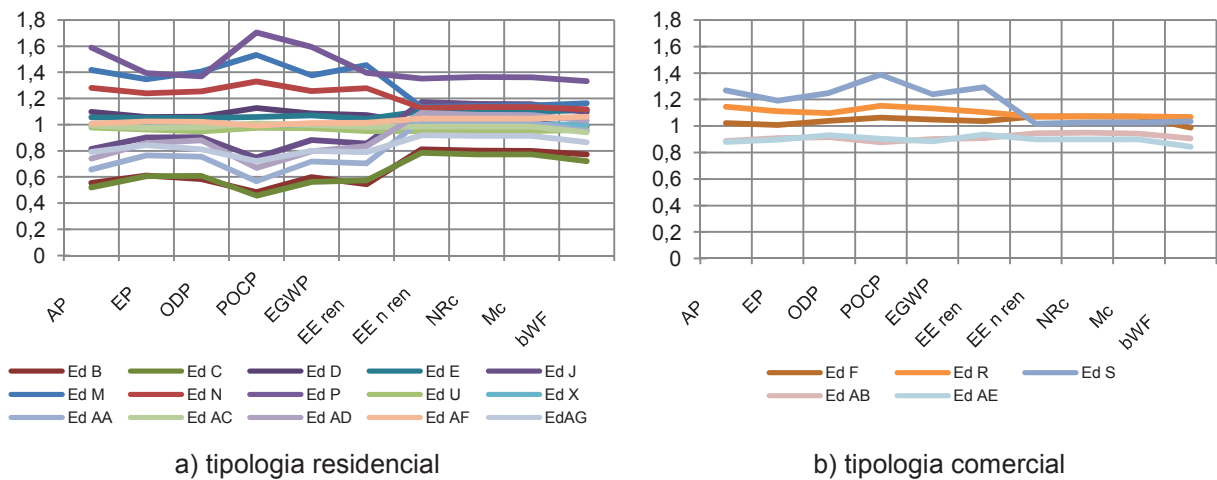


Figura 6.19 - Valores normalizados dos indicadores ambientais dos pavimentos-tipo das edificações residenciais (a) e comerciais (b)

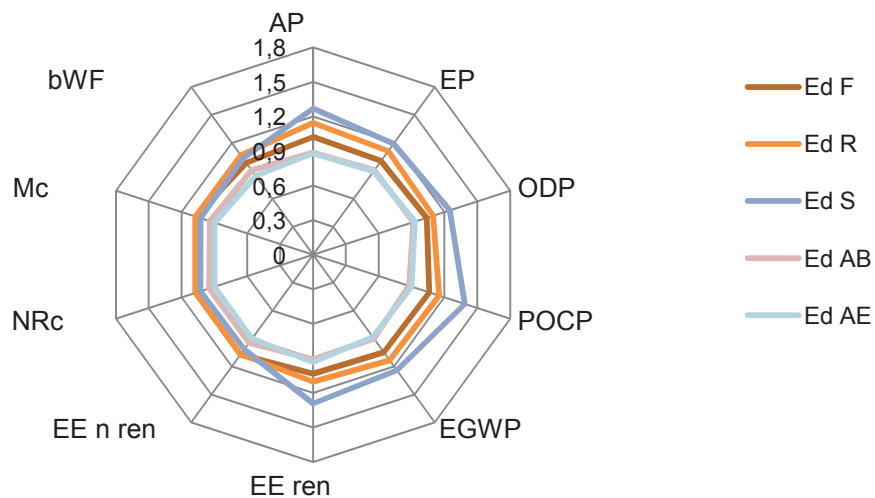


Figura 6.20 - Perfil de desempenho ambiental do sistema estrutural dos pavimentos-tipo das 5 (cinco) edificações de tipologia comercial (CP)

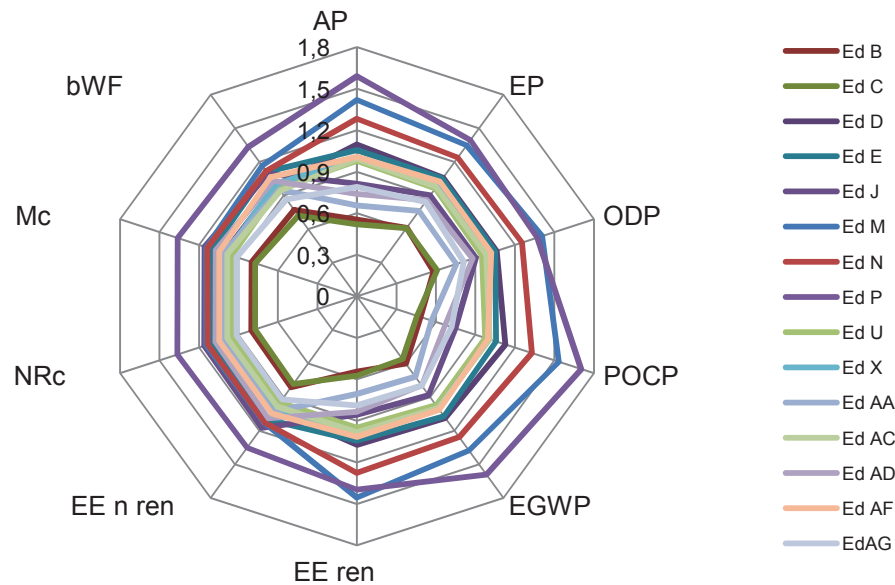


Figura 6.21 - Perfil de desempenho ambiental do sistema estrutural dos pavimentos-tipo das 15 (quinze) edificações de tipologia residencial (CP)

Assim como observado para o desempenho ambiental, os valores dos indicadores técnico-funcionais das estruturas das edificações comerciais estão dentro do intervalo de valores das residenciais (Figura 6.22).

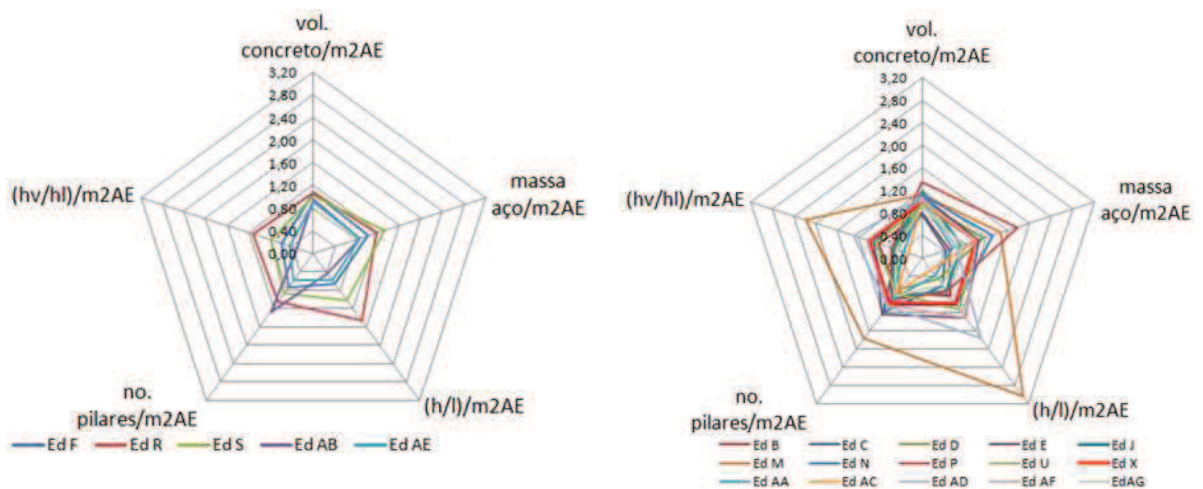


Figura 6.22 - Perfis de desempenho técnico-funcional do sistema estrutural dos pavimentos-tipo das tipologias comercial (5) e residencial (15)

### 6.3.4 Indicador econômico: custo do ciclo de vida

O Quadro 6.1 mostra os materiais utilizados, os custos unitários considerados e a fonte dos dados para cálculo do custo do ciclo de vida (CCV) dos sistemas estruturais no software *Life-365 v2.1.1*. O escopo de custos adotado abrange os estágios de pré-uso e uso da edificação. As quantidades dos materiais foram descritas na Tabela 5.1 e Tabela 5.2 do capítulo 5 (abordagem metodológica) e referem-se aos pavimentos-tipo dos estudos de caso.

**Quadro 6.1 - Materiais empregados, preços unitários incluindo mão de obra e fonte dos dados**

Materiais empregados		Fonte dos dados	Custo unitário [R\$]
Concreto usinado c/ bombeamento, fornecimento e aplicação, 5% de perdas, 6% de taxa para concreto bombeável.	C25	site <a href="http://iopes.no-ip.info">http://iopes.no-ip.info</a> , (fev 2013)	370,50 / m <sup>3</sup>
	C30		383,86 / m <sup>3</sup>
	C35		397,70 / m <sup>3</sup>
Fôrmas madeira compensada resinada*, esp. 12mm, reforçada com sarrafos 2,5x10,0 e escoramento pontaletes 8x8, incluindo material, corte, montagem e desfôrma.			110,91 / m <sup>2</sup>
Aço CA-50 incluindo fornecimento, dobragem e colocação nas formas.			7,07 / kg
Aço CP-190 incluindo fornecimento cordoalhas engraxadas, ancoragens (placa + cunha) e serviços protensão.		PTE Pós-tensão Engenharia Ltda, (abril 2013)	6,80**/ kg
*considerando reaproveitamento máximo de 5x nos pavimentos-tipo			
** R\$ 4,20 / kg cordoalhas + R\$ 2,60 / kg serviços e ancoragens			

#### 6.3.4.1 CCV calculado para o sistema estrutural dos pavimentos-tipo

O custo do ciclo de vida é calculado no nível do pavimento-tipo e seu resultado, em R\$/m<sup>2</sup><sub>AB</sub>, é representativo da superestrutura, uma vez que é função do consumo de materiais empregado, cujos valores dos indicadores que o representam - indicadores de consumo de aço e concreto, bem como o de consumo de materiais, Mc, e o conteúdo não renovável, NRC – foram estatisticamente iguais (nível de significância de 5%), na comparação entre a superestrutura e o pavimento-tipo dos trinta e um estudos de caso analisados.

A Tabela 6.15 mostra os dados adaptados de entrada no *Life-365 v2.1.1* para cálculo do CCV. O custo de reparos foi composto pelo custo do concreto por unidade de área [R\$/m<sup>2</sup>], que por default do software, foi considerado igual a quatro vezes o custo do metro cúbico, somado ao

custo dos aços [R\$/m<sup>2</sup>], calculado com a quantidade estimada de aço dos reparos multiplicada pelo custo ponderado dos aços e dividida pela área estrutural.

**Tabela 6.15 - Composição dos custos de reparos para adaptação na entrada de dados no software *Life-365 v.2.1.1* incluindo fôrmas, aços (CA e CP), concreto e mão-de-obra de recuperação para cálculo do CCV do pavimento-tipo**

Edificação	Custo (concreto + fôrmas) para a entrada “custo do concreto” [R\$/m <sup>3</sup> ]	Média ponderada custo aços (CA + CP) [R\$/kg]	Massa aços (CA + CP) na construção [kg]	Custo reparo aços (CA + CP) para somar ao custo de reparo do concreto [R\$/m <sup>2</sup> ]	Custo composto de reparos (= 4 x custo do m <sup>3</sup> concreto + custo reparos aços) [R\$/m <sup>2</sup> ]
Ed A	564,74	7,07	10657,00	36,58	1572,02
Ed B	510,81	6,98	4493,00	27,89	1563,33
Ed C	540,05	6,98	6565,00	25,03	1560,47
Ed D	529,08	7,02	16333,00	50,23	1585,67
Ed E	523,47	7,02	8437,00	47,68	1583,12
Ed F	519,09	7,03	12344,00	42,73	1578,17
Ed G	698,30	7,07	3801,40	33,02	1568,46
Ed H	675,00	7,07	8153,00	32,17	1567,61
Ed I	603,29	7,07	4952,56	32,72	1514,72
Ed J	521,03	7,00	9339,00	30,90	1566,34
Ed k	437,07	7,07	15338,00	53,05	1588,49
Ed L	539,49	7,07	10975,00	43,90	1579,34
Ed M	553,87	7,04	4821,11	57,96	1593,40
Ed N	541,01	7,02	10171,89	52,17	1587,61
Ed O	449,34	7,07	13162,12	66,86	1602,30
Ed P	470,35	7,03	21840,67	44,17	1579,61
Ed Q	605,19	7,07	8141,20	46,98	1582,42
Ed R	527,75	7,01	7508,82	54,66	1590,10
Ed S	544,50	7,04	12091,17	58,24	1593,68
Ed T	607,32	7,07	5590,60	30,45	1565,89
Ed U	529,09	7,01	7986,20	46,79	1582,23
Ed V	436,15	7,07	9070,00	53,49	1588,93
Ed X	535,64	7,01	7147,00	44,67	1580,11
Ed Z	595,52	7,07	2348,00	19,05	1554,49
Ed AA	528,49	6,98	11634,00	24,16	1559,60
Ed AB	552,89	7,01	20318,00	40,81	1631,61
Ed AC	526,42	7,02	26843,95	45,65	1581,09
Ed AD	544,68	7,00	3459,00	25,62	1561,06
Ed AE	549,34	7,03	14168,30	46,22	1581,66
Ed AF	537,72	7,01	6848,30	42,30	1577,74
EdAG	539,96	6,99	11306,30	40,61	1576,05

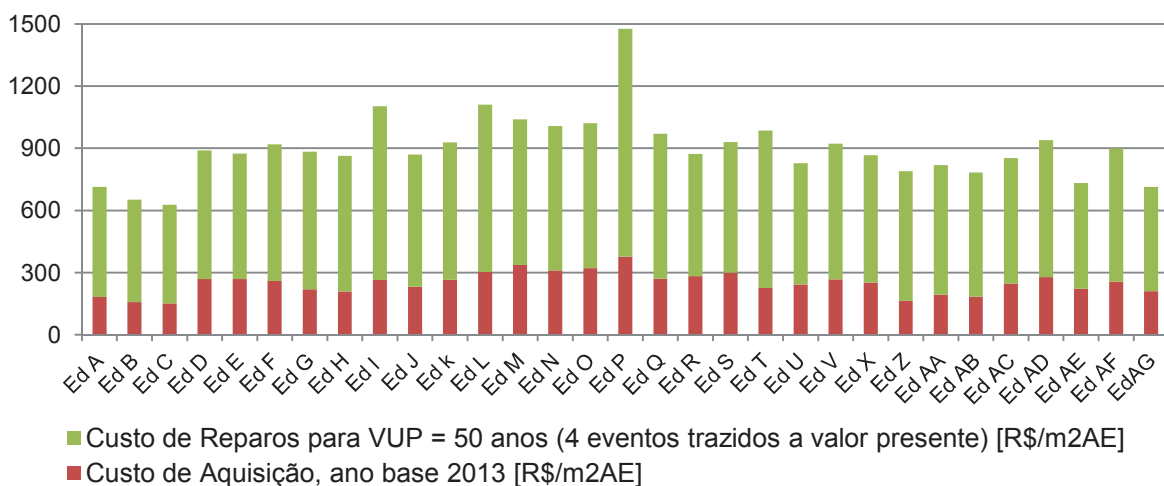
Os resultados do CCV são apresentados na Tabela 6.16, que contém as variáveis consideradas de acordo com o escopo da ACCV definido para esta pesquisa, quais sejam, *custo de aquisição* - em que foram computados custos dos materiais, serviços e insumos da construção - e *custo de manutenção e reparos*. Valores em negrito indicam, entre os estudos de caso, os melhores resultados de custos que compõem o CCV.

**Tabela 6.16 - Resultados do CCV e suas variáveis para os pavimentos-tipo estudados**

Edificação	Tipo de laje	VUe laje [anos]	Custo de aquisição [R\$/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	Custo de Reparos [R\$/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	Custo do Ciclo de Vida, CCV [R\$/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]
Ed A	CA	11,7	182,92	530,93	713,85
Ed B	CP	11,2	158,11	493,75	651,86
Ed C	CP	11,2	<b>151,34</b>	<b>476,39</b>	<b>627,73</b>
Ed D	CP	11,2	268,59	621,05	889,64
Ed E	CP	12,1	269,14	605,68	874,83
Ed F	CP	11,2	260,12	659,19	919,31
Ed G	CA	11,9	218,92	665,53	884,61
Ed H	CA	11,9	209,31	654,78	864,09
Ed I	CA	10,4	264,92	838,63	1103,55
Ed J	CP	12,1	231,59	638,58	870,17
Ed k	CA	11,6	266,32	662,53	928,86
Ed L	CA	11,8	303,41	806,73	1110,14
Ed M	CP	11,2	336,57	702,88	1038,96
Ed N	CP	11,2	310,67	696,95	1007,62
Ed O	CA	11,2	321,95	698,59	1020,54
Ed P	CP	11,2	377,34	1099,35	1476,69
Ed Q	CA	11,7	269,93	700,19	970,11
Ed R	CP	12,1	282,35	590,58	872,93
Ed S	CP	11,2	299,33	630,48	929,81
Ed T	CA	11,9	225,31	760,98	986,29
Ed U	CP	11,2	243,27	585,12	828,39
Ed V	CA	11,8	266,66	656,26	922,92
Ed X	CP	11,2	251,53	614,99	866,52
Ed Z	CA	11,4	163,72	625,54	789,25
Ed AA	CP	11,2	193,84	625,63	819,47
Ed AB	CP	11,2	183,22	600,71	783,93
Ed AC	CP	11,2	248,06	605,51	853,56
Ed AD	CP	11,2	278,45	661,71	940,16
Ed AE	CP	11,5	222,83	509,47	732,30
Ed AF	CP	11,2	256,48	643,16	899,64
EdAG	CP	12,1	210,07	503,33	713,40



Como descrito no capítulo 5, para o cálculo do custo de manutenção/repares, foram considerados: (i) um período de referência de 50 anos, equivalente à VUP adotada para cálculo dos indicadores ambientais; (ii) 2013 como ano base; e (iii) quatro eventos de reparos previstos, com intervalo de 10 anos entre eles, a partir da vida útil estimada (VUe), que corresponde à data para o primeiro reparo. As taxas de inflação e desconto adotadas, cujos valores de 6,59% e 7,5% correspondem ao IPCA e a SELIC de abril de 2013, foram mantidas constantes durante o período de referência, para o cálculo do valor presente. A Figura 6.23 retrata os resultados da Tabela 6.16. O melhor desempenho econômico coube aos sistemas estruturais em concreto protendido das Ed.C, Ed.B e Ed.AG, nesta ordem, seguidos da Ed.A, em concreto armado.



**Figura 6.23 - Custo do ciclo de vida por unidade de área estrutural [R\$/m<sup>2</sup><sub>AE</sub>] calculado pela soma dos custos de aquisição e custos de reparos trazidos a valor presente – ano base 2013 – para 50 anos de vida útil de projeto**

Para estes estudos de caso, pode-se perceber que a mediana dos custos de reparos dos sistemas de lajes em concreto armado é levemente maior (~8%) que a dos sistemas em lajes protendidas. Observa-se que os custos de reparos (72% do CCV) foram, em média, 2,7 vezes maiores que os custos de aquisição.

Particularizando para cada grupo, nos sistemas estruturais em concreto armado, os custos de reparos (74% do CCV) foram, em média, 2,9 vezes maiores que os custos de aquisição. Nas estruturas em concreto protendido, os custos de reparos (71% do CCV) foram 2,6 vezes maiores que os de aquisição.

Estes resultados são bastante próximos dos valores de recente publicação do CIB (CÓIAS, 2013) que verificou, ao relacionar o custo de manifestações patológicas ao CCV de edificações no

contexto europeu, que os custos de aquisição correspondem de 17% a 25% do CCV (estágio de pré-uso), enquanto os custos de manutenção e fim de vida (estágios de uso e pós-uso) da edificação representam cerca de 75% a 83% do CCV.

Percebe-se que, particularizando-se para o sistema estrutural nas condições deste estudo, as proporções entre estágios de pré-uso e uso são próximas às obtidas considerando-se todos os sistemas construtivos da edificação. Acredita-se, no entanto, que para dimensionamentos em ambientes menos agressivos (classes I e II da ABNT NBR 6118:2007), a parcela correspondente ao estágio de pré-uso aumente, devido à diminuição de custos de reparos no estágio de uso, provocada pela redução ou possível eliminação dos eventos de reparos dos sistemas estruturais, em condições menos agressivas.

Ao nível de significância de 5%, exceto para os custos de reparos, os custos de aquisição e o custo total do ciclo de vida, CCV, apresentaram resultados estatisticamente iguais entre sistemas estruturais em concreto armado e protendido ( Tabela 6.17). Os valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade dos componentes do CCV, numa análise comparativa entre resultados dos grupos CA e CP dos pavimentos-tipo dos estudos de caso, são apresentados no Apêndice B.

**Tabela 6.17 - Resultados do p-valor e Mann-Whitney U para os componentes do CCV dos pavimentos-tipo dos sistemas estruturais em CA e CP (Stathsoft Statistica 10)**

Variável	Soma dos postos CA	Soma dos postos CP	U	p-valor
Custo Inicial ou Custo de Construção, [R\$/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	170,0	326,0	104,0	0,82
Custo Reparos na VUP 50 anos, [R\$/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	238,0	258,0	48,0	0,01
Custo do Ciclo de Vida, CCV, [R\$/m <sup>2</sup> <sub>AE</sub> ]	214,0	282,0	72,0	0,12

#### **6.3.4.2 Equivalência de desempenho econômico dos sistemas estruturais das tipologias comercial e residencial**

O perfil de desempenho econômico mostra os valores dos indicadores das estruturas de edificações comerciais dentro do intervalo de resultados dos indicadores das edificações residenciais, ambas em concreto protendido (Figura 6.24).

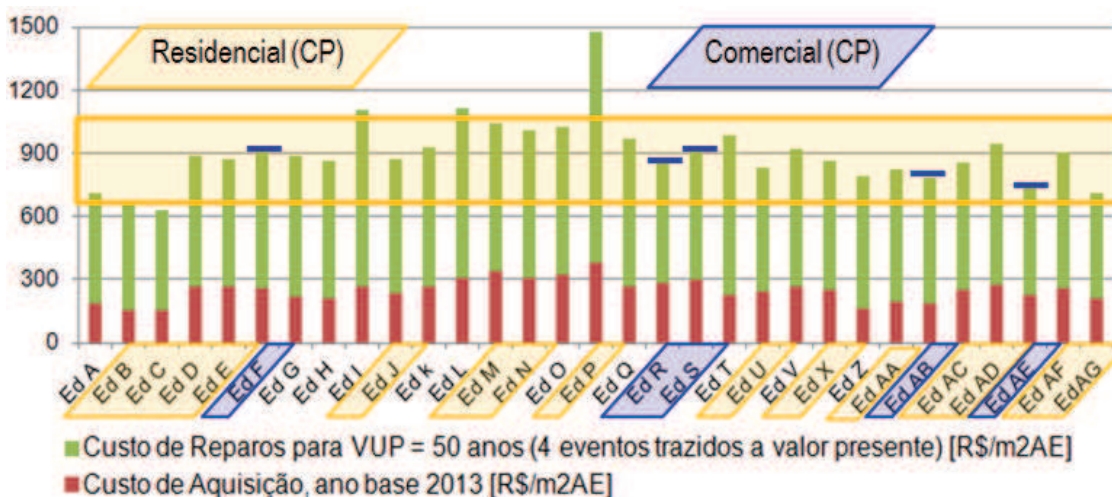


Figura 6.24 Perfil de desempenho econômico das estruturas de edificações comerciais e residenciais em concreto protendido

#### 6.4 CENÁRIOS DE IMPORTÂNCIA RELATIVA ENTRE AS DIMENSÕES (ETAPA 5)

Alternativas de estruturação do conjunto de indicadores para diferentes cenários de importância relativa entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica são disponibilizadas em uma planilha onde o usuário escolhe os pesos (graus de importância) entre as três dimensões. Para exemplificar este tipo de saída de resultados, o Quadro 6.2 apresenta três diferentes cenários de importância entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica predefinidos para ilustrar potenciais perspectivas de diferentes partes interessadas.

Quadro 6.2 Cenários de importância relativa entre as três dimensões

Cenário	Dimensões		
	Técnico-funcional	Ambiental	Econômica
G1	1/3	1/3	1/3
G2	0,2	0,4	0,4
G3	0,1	0,8	0,1

Estes três cenários foram aplicados aos valores dos indicadores técnico-funcionais dos pavimentos-tipo ponderados com os pesos obtidos das médias de votos do painel de especialistas, aos valores dos indicadores ambientais das superestruturas ponderados pela adaptação do *Eco-Indicator 99* (BUDAVARI et al, 2011) e aos valores normalizados do indicador CCV.

A Figura 6.25 mostra o resultado do conjunto de indicadores ponderados pelo cenário G1, em que pesos iguais são atribuídos aos indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico. O sistema estrutural com melhor desempenho global nas três dimensões avaliadas (técnico-funcional, ambiental e econômica) é o que apresentou o menor valor (Ed.C), seguido dos sistemas estruturais das Ed.AE, Ed.AG, Ed.A e Ed.AC. Os de desempenho global mais fraco foram das Ed.I e Ed.M. Os resultados para o cenário G2, em que se prioriza igualmente as dimensões ambiental e econômica em detrimento da funcional, por meio de pesos iguais a 0,2; 0,4; 0,4 entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica, são ilustrados na Figura 6.26 e, praticamente, coincidem com os do cenário G1.

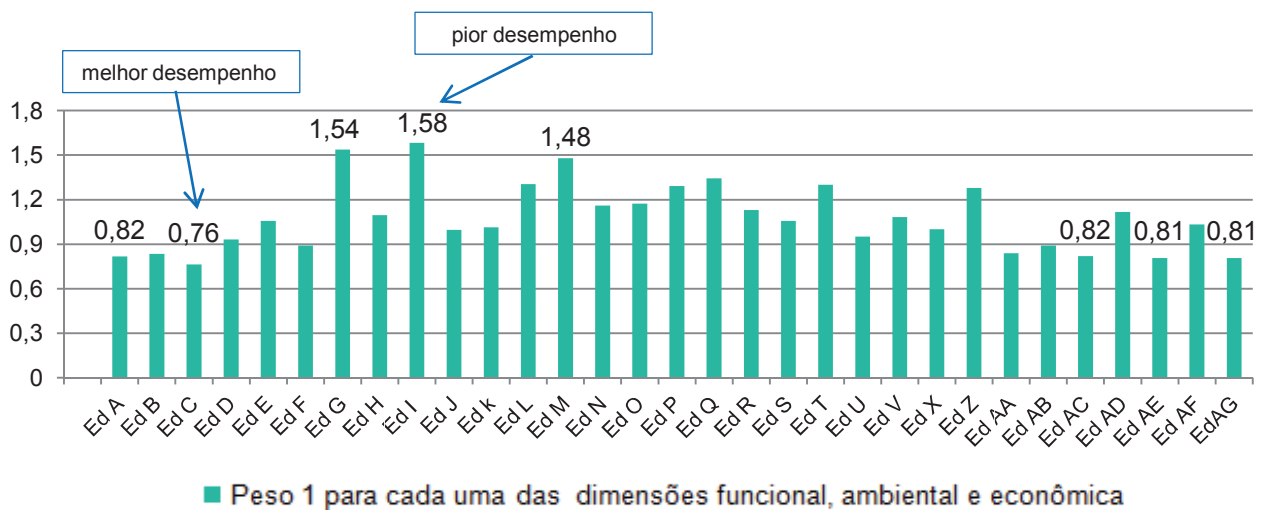


Figura 6.25 - Resultados do conjunto de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico para o cenário G1 de importância relativa entre as três dimensões (pesos iguais)

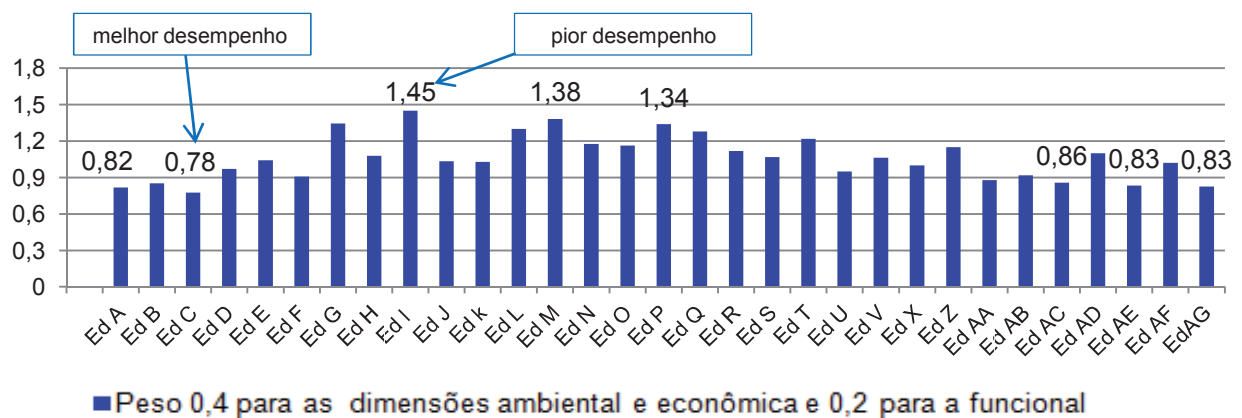
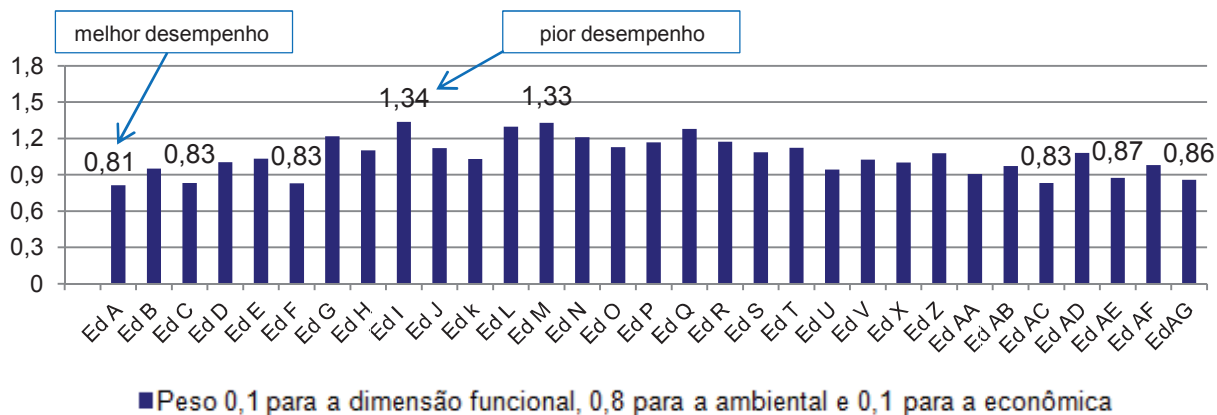


Figura 6.26 - Resultados do conjunto de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico para o cenário G2 de importância relativa entre as três dimensões

A Figura 6.27 por sua vez, apresenta os resultados para o cenário G3, em que o foco recai sobre a dimensão ambiental, com pesos iguais a 0,1; 0,8; 0,1 entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica, respectivamente. Nesta figura, o melhor desempenho nas referidas dimensões, ou o melhor desempenho quanto aos aspectos de sustentabilidade considerados nesta tese, foi apresentado pela Ed.A (concreto armado), seguida pelas estruturas das Ed.C, Ed.F, Ed.AC, Ed.AG e Ed.AE, todas em concreto protendido. O pior desempenho global coube à Ed.I, assim como nos cenários G1 e G2.



**Figura 6.27 - Resultados do conjunto de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico para o cenário G3 de importância relativa entre as três dimensões**

A definição de cenários de importância relativa entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica oferece um resultado único de desempenho global, de acordo com as perspectivas das partes interessadas, o que facilita a tomada de decisão tanto entre desempenhos de estruturas existentes (como neste trabalho), como entre alternativas de sistema estrutural para um novo projeto. Os cenários G1 e G2 apontam para o sistema estrutural da Ed.C como o de melhor desempenho global, enquanto que, de acordo com o cenário G3, este posto coube à estrutura da Ed.A. Observou-se ainda, que para os três cenários, o pior desempenho global coube ao sistema estrutural da Ed.I. Possivelmente, por ser o único em concreto C25 (fck25MPa), sendo a Ed.AB em concreto C35 e as demais, em concreto C30.

Os resultados de desempenho de cada dimensão, por sua vez, apontaram a Ed.C como de melhor desempenho ambiental (cenários A1 e A2), e também econômico, enquanto o melhor desempenho técnico-funcional coube à Ed.AC, para o cenário T1, e à Ed.AA, para o cenário T2. Destaca-se assim, que o conjunto de indicadores de desempenho proposto, com possibilidade de oferecer resultados individuais, agregados em cada dimensão, ou expressos num resultado global,

foi capaz de quantificar e diferenciar o desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico de sistemas estruturais em concreto, nas condições do estudo.

## 6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Os resultados dos indicadores técnico-funcionais foram apresentados individualmente, para os pavimentos-tipo e seus valores foram tratados estatisticamente e discutidos. A unidade funcional adotada para todos os indicadores foi a área estrutural para sobrecarga residencial e comercial e 50 anos de vida útil de projeto (VUP). Os indicadores de *consumo de aço* [ $\text{kg}/\text{m}^2_{\text{AE}}$ ] e *consumo de concreto* [ $\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{AE}}$ ] foram calculados também para a superestrutura, e a análise estatística confirmou sua equivalência nas duas situações, atestando a validade de se considerar o pavimento-tipo representativo da superestrutura para avaliação do desempenho técnico-funcional.

Os resultados foram normalizados em relação a um dos sistemas estruturais (Ed.X) e ponderados com a finalidade de permitir sua agregação em um resultado único, sendo apresentados em três diferentes formatos: (i) resultado técnico-funcional individual, (ii) resultado adimensional normalizado e ponderado para a dimensão técnico-funcional, e (iii) resultado ponderado global (com as 3 dimensões). O processo de análise hierárquica foi utilizado com consulta a um painel de especialistas, determinando a ponderação adotada no cenário T1. Um cenário T2 com pesos iguais também foi considerado, verificando-se não ter havido interferência significativa da ponderação por AHP nos resultados.

Somente os indicadores de *consumo de aço e relação h/l* apresentaram valores estatisticamente iguais entre os grupos de estruturas em concreto armado (CA) e concreto protendido (CP). Os pavimentos-tipo em CA apresentaram menor *consumo de concreto* e mesmo *consumo de aço* que os pavimentos-tipo em CP que, por sua vez, apresentaram melhor desempenho (medianas menores) quanto a *densidade de pilares e relação (hv/hl)/m<sup>2</sup><sub>AE</sub>*. Com os resultados ponderados e agregados, o melhor *desempenho técnico-funcional* entre os 31 casos avaliados coube aos sistemas estruturais em *concreto protendido* das edificações Ed.AA, Ed.AC e Ed.C, nesta ordem (para ponderação por pesos iguais), e às Ed.AC, Ed.AA e Ed.AE, quando ponderados por AHP.

A vida útil estimada (VUe) das lajes do pavimento-tipo das edificações foi calculada no *Life-365 v.2.1.1* para ambiente marinho, a 800m do mar, considerando temperaturas médias anuais de Vitória, ES, e Rio de Janeiro, RJ, e cobrimento mínimo das armaduras igual a 2,0cm. Tendo em vista os baixos valores de VUe obtidos, foram realizadas análises de sensibilidade quanto a

estratégias para aumentá-la, a fim de atender a VUP de 50 anos. A VUe foi sensível ao uso de inibidor de corrosão na mistura do concreto que com 27,5litros de  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2/\text{m}^3$  aumentou seu valor cerca de 5 vezes; e ao cobrimento das armaduras, que com acréscimo de 1cm, aumentou cerca de 45% a vida útil estimada no software *Life-365 v.2.1.1*.

Observou-se, portanto, que o dimensionamento estrutural para um ambiente marinho, com base na ABNT NBR 6118:2007, não garantiu conformidade com a ABNT NBR 15575:2013. A análise feita com o cobrimento mínimo para classe III, sem a redução para classe II permitida pela ABNT NBR6118:2007, mostrou significativo acréscimo da VUe, embora insuficiente para garantir a VUP de 50 anos. Ainda que a previsão da vida útil feita pelo software *Life-365 v.2.1.1* possa ser conservativa, o estudo sugere a necessidade de revisão dos cobrimentos especificados para as armaduras na classe III de agressividade ambiental da ABNT NBR 6118:2007 e da sua versão 2013, em período de consulta no site da ABNT até 15/10/2013.

Na comparação entre os grupos CA e CP para pavimento-tipo, a análise estatística dos valores encontrados mostrou que os indicadores ambientais *potencial de acidificação (AP)*, *potencial de eutrofização (EP)*, *potencial formação de ozônio fotoquímico (POCP)*, *potencial de depleção da camada de ozônio (ODP)*, *potencial de aquecimento global (EGWP)* e *energia primária renovável incorporada ( $EE_{ren}$ )* são iguais entre os dois grupos, o que não se observou nos valores de *energia primária não renovável incorporada ( $EE_{n,ren}$ )*, *conteúdo não renovável (NRc)*, *consumo de materiais (Mc)*, e *pegada de água azul (bWF)*, que são menores para os sistemas estruturais em concreto armado.

A mesma análise, feita para superestrutura, indicou que os valores dos indicadores ambientais para os grupos CA e CP são estatisticamente iguais, à exceção de bWF,  $EE_{ren}$  e ODP que apresentaram maiores valores de pegada de água azul e menores de ODP e  $EE_{ren}$  para concreto protendido.

Na comparação entre resultados dos indicadores para pavimento-tipo e para superestrutura, o p-valor mostrou que somente os valores de  $EE_{n,ren}$ , NRc e Mc foram estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%. Os perfis de desempenho ambiental dos pavimentos-tipo e superestruturas não apresentaram a mesma tendência entre indicadores e, por esta razão, na avaliação do desempenho ambiental infere-se não ser adequado considerar o pavimento-tipo como representativo de toda a superestrutura para as tipologias estudadas.

O cenário A1 de ponderação para os indicadores ambientais foi definido a partir da ponderação hierárquica do sistema de avaliação de impactos *Eco-Indicator 99*, largamente utilizado pelos profissionais familiarizados com a técnica de ACV, segundo os quais, as escolhas subjetivas da versão hierárquica são, em geral, científica- e politicamente aceitas. Um cenário A2 com pesos iguais foi considerado para verificar se o uso da ponderação adaptada do *Eco-Indicator 99* não distorceu resultados, mostrando tendências semelhantes entre os diferentes cenários de ponderação.

O sistema estrutural da Ed.C (CP) apresentou o melhor desempenho ambiental ponderado, de acordo com ambos os cenários para os indicadores calculados para pavimento-tipo. Não obstante os sistemas em concreto protendido tenham apresentado melhor desempenho ambiental ponderado também para superestrutura, o melhor resultado para os cenários A1 e A2 coube a diferentes edificações - Ed.F e Ed.AC - respectivamente.

O perfil de desempenho ambiental referente às tipologias comercial e residencial foi apresentado separadamente e os resultados dos indicadores confirmaram a premissa inicial de que não há diferença de desempenho do sistema estrutural entre as referidas tipologias, o que foi observado também entre as demais dimensões (técnico-funcional e econômica). Os valores dos indicadores para tipologia comercial estão dentro do intervalo de resultados dos indicadores para tipologia residencial, e os indicadores apresentaram as mesmas tendências entre as duas tipologias.

O indicador econômico (CCV) foi calculado para pavimento-tipo, com auxílio do *software Life-365 v.2.1.1*, para um período de referência de 50 anos; ano base 2013; taxas de inflação e desconto iguais a 6,59% e 7,5% correspondem ao IPCA e a SELIC de abril de 2013 e foram mantidas constantes durante o período de referência, para o cálculo do valor presente dos custos dos eventos de reparos, tal como considerados para os indicadores ambientais. Seu resultado em  $\text{R\$}/\text{m}^2_{\text{AE}}$  é representativo da superestrutura, porquanto é função do consumo de materiais, cujos valores dos indicadores que o representam - indicadores técnico-funcionais de consumo de aço e concreto, e ambientais, Mc (englobando fôrmas) e NRc - foram estatisticamente iguais (nível de significância de 5%), na comparação entre a superestrutura e o pavimento-tipo dos trinta e um casos analisados.

Os CCV foram compostos pelo *custo de aquisição* - em que foram computados custos dos materiais, serviços e insumos da construção - e *custo de manutenção e reparos*, variáveis consideradas de acordo com o escopo de custos da ACCV definido para este trabalho. Observou-



se que os custos de aquisição responderam, em média, por 28% do custo total do ciclo de vida e que os custos de reparos (72% do CCV) foram, em média, 2,7 vezes maiores que os custos de aquisição. O melhor desempenho econômico coube aos sistemas estruturais em concreto protendido das Ed.C, Ed.B e Ed.AG, nesta ordem, seguidos da Ed.A em concreto armado.

A análise estatística dos valores do CCV indicou que, ao nível de significância de 5%, à exceção dos custos de reparos, os custos de aquisição e o custo total do ciclo de vida, CCV, apresentaram resultados iguais entre sistemas estruturais em concreto armado e protendido. A medianas dos custos de reparos foi 8% maior para os sistemas em lajes em concreto armado.

O desempenho global de cada estudo de caso foi apresentado, obtido a partir da definição de cenários de ponderação entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica, em que pesos atribuídos a cada uma delas são multiplicados pelo valor normalizado, ponderado e agregado dos indicadores de cada dimensão, que em seguida são somados. Desta forma, o conjunto de indicadores de desempenho proposto, com possibilidade de oferecer resultados individuais, agregados em cada dimensão, ou expressos num resultado global, foi capaz de quantificar e diferenciar o desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico de sistemas estruturais em concreto, nas condições do estudo.

Dentre três diferentes cenários globais de ponderação, predefinidos para ilustrar potenciais perspectivas de diferentes partes interessadas, os cenários G1 e G2 apontaram para o sistema estrutural da Ed.C (CP) como o de melhor desempenho global, enquanto que, de acordo com o cenário G3, o melhor desempenho coube à estrutura da Ed.A (CA). Para os três cenários, o pior desempenho global coube ao sistema estrutural da Ed.I, que emprega concreto com a menor classe de resistência (C25) entre os estudos de caso.

### **6.5.1 Resumo dos resultados dos estudos de caso**

As medianas de resultados individuais dos indicadores para a amostra total de trinta e um estudos de caso e amostras parciais de estudos de caso em concreto armado e estudos de caso em concreto protendido são apresentadas na Tabela 6.18. Estes resultados, obtidos de modo sistematizado e cientificamente reconhecido, podem ser rastreados e representam uma contribuição inicial para o estabelecimento de valores de referência nacionais, para indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico de sistemas estruturais em concreto, de edificações residenciais e comerciais de tipologia vertical.

**Tabela 6.18 - Conjunto de indicadores de desempenho de sistemas estruturais em concreto, sua descrição, métricas e medianas dos valores dos indicadores calculados para: os 31 estudos de caso; 11 estudos de caso em concreto armado (CA); e 20 em concreto protendido (CP)**

Indicadores de desempenho de sistemas / elementos estruturais		Medianas		
		11 CA	20 CP	31 estudos de caso
Técnico-Funcionais	<b>Relação entre altura e vão por unidade de área estrutural</b> ( $h/l$ )/ $m^2_{AE}$ para a direção considerada (aplicável principalmente a lajes) [ $m^2_{AE}$ ]	7,53E-05	5,03E-05	6,37E-05
	<b>Relação entre número de pilares e área estrutural do pavimento (Densidade de pilares)</b> $n^0/m^2_{AE}$ [ $m^2_{AE}$ ]	0,0561	0,0397	0,0450
	<b>Relação entre altura de viga e laje por unidade de área estrutural</b> ( $h_v/h_l$ ) / $m^2_{AE}$ (m/m) / $m^2_{AE}$ [ $m^2_{AE}$ ]	7,54E-03	1,85E-03	2,41E-03
	<b>Relação entre volume de concreto e área estrutural (consumo de concreto = espessura equivalente)</b> [ $m^3/m^2_{AE}$ ]	0,18	0,22	0,21
	<b>Relação entre massa de aço e área estrutural (consumo de aço)</b> [ $kg/m^2_{AE}$ ]	19,89	19,19	19,23
Ambientais (superestrutura)	<b>Potencial de aquecimento global (EGWP)</b> [ $kgCO_{2-eq}/uf/m^2_{AE}$ ]	84,04	77,06	78,04
	<b>Energia primária incorporada renovável (EE<sub>ren</sub>)</b> [ $MJ/uf/m^2_{AE}$ ]	890,16	694,40	724,62
	<b>Energia primária incorporada não renovável (EE<sub>n ren</sub>)</b> [ $MJ/uf/m^2_{AE}$ ]	120,17	129,14	123,71
	<b>Pegada de Água Azul (bWF)</b> [ $m^3/uf/m^2_{AE}$ ]	1,82	2,14	1,94
	<b>Consumo de Recursos Materiais (Mc)</b> [ $kg/uf/m^2_{AE}$ ] (aços + concreto + fôrmas de madeira compensada).	747,30	805,03	769,93
	<b>Conteúdo não renovável (Conteúdo Abiótico) (NRc)</b> [( $kg_{material\ total} - kg_{reciclado} - kg_{reutilizado}$ ) / $uf/m^2_{AE}$ ]	646,39	702,39	668,68
	<b>Potencial de acidificação (AP)</b> [ $kg\ SO_{2-eq}/uf/m^2_{AE}$ ]	0,186	0,166	0,173
	<b>Potencial de eutrofização (EP)</b> [ $kg\ (PO_4)_{3-eq}/uf/m^2_{AE}$ ]	0,037	0,033	0,034
	<b>Potencial de depleção da camada estratosférica de ozônio (ODP)</b> [ $kg\ CFC_{11-eq}/uf/m^2_{AE}$ ]	2,44E-06	1,95E-06	2,02E-06
<b>Potencial formação de ozônio fotoquímico (POCP)</b> [ $kg\ C_2H_4-eq/uf/m^2_{AE}$ ]	0,023	0,019	0,020	
Econômico	<b>Custo do ciclo de vida, CCV</b> = custo de aquisição + custo de manutenção/repares [ $\$/m^2_{AE}$ ]	928,86	871,55	884,61
	<b>Custo de aquisição</b> (custo inicial de projeto e construção) [ $\$/m^2_{AE}$ ]	264,92	254,01	256,48
	<b>Custo de manutenção e reparos</b> [ $\$/m^2_{AE}$ ]	665,53	618,02	638,58



## 7 CONCLUSÕES

As principais contribuições desta tese à comunidade técnica brasileira são a oferta de *(i) um elenco de indicadores ambientais cuidadosa e sistematicamente selecionados e testados para uma amostra considerável de sistemas estruturais correntemente projetados no país, além de uma metodologia e critérios para sua agregação*; e de *(ii) valores iniciais de referência para os indicadores propostos*, visando a balizar avaliações de sistemas estruturais durante o desenvolvimento de novos projetos.

Os indicadores propostos descrevem os requisitos de desempenho técnico-funcional, econômico e ambiental, em cujo atendimento o sistema estrutural exerce papel preponderante. Alinhando-se a diretrizes e normalização na fronteira de conhecimento, o método de cálculo dos indicadores, embasado cientificamente, assegura sua rastreabilidade e replicabilidade e possibilita futuras comparações com resultados de outras pesquisas. A definição de cenários de importância relativa entre as dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica permitiu obter um resultado único de desempenho global, de acordo com as perspectivas das partes interessadas, o que facilitaria a tomada de decisão e opção por uma determinada solução de projeto.

A partir dos resultados obtidos para trinta e um estudos de caso, obteve-se valores de referência - antes praticamente inexistentes - para as métricas sugeridas, que poderão influenciar a tomada de decisão futura para seleção do sistema estrutural, com base em aspectos importantes de sustentabilidade, distribuídos nas dimensões técnico-funcional, ambiental e econômica.

Em síntese, estes resultados obtidos na pesquisa desenvolvida confirmaram:

- (i)* que os indicadores são capazes de mostrar diferenças entre os sistemas estruturais, tanto para pavimento-tipo quanto para superestrutura, bem como entre sistemas em concreto armado e em concreto protendido.

Para as condições do estudo, os sistemas em laje lisa protendida das Ed.AC e Ed.AA, com 21 e 15 pavimentos, apresentaram melhor desempenho técnico-funcional global. As superestruturas em laje lisa protendida das Ed.AC e Ed.F (18 pavimentos) apresentaram melhor desempenho

ambiental global e os melhores resultados quanto ao desempenho econômico couberam às estruturas em laje lisa protendida das Ed.C, Ed.B e Ed.AG, com 6, 15 e 9 pavimentos, respectivamente.

Considerando-se os cenários globais de ponderação G1 e G2 entre as três dimensões, o melhor desempenho coube à Ed.C em concreto protendido. Apenas quando se prioriza o desempenho ambiental (G3), a estrutura em concreto armado (Ed.A) com 6 pavimentos ultrapassa o desempenho global dos sistemas protendidos. Pode-se concluir, portanto, que para a amostra estudada, as estruturas protendidas apresentam melhor desempenho nas três dimensões de sustentabilidade consideradas.

(ii) não haver diferença entre as tipologias residencial e comercial para a finalidade desse estudo

Os resultados dos indicadores confirmaram a premissa inicial de que não há diferença no sistema estrutural das tipologias comercial e residencial, em todas as dimensões aqui analisadas. Os valores dos indicadores das estruturas de tipologia comercial inserem-se no intervalo de resultados dos indicadores das estruturas de tipologia residencial, e os indicadores apresentaram as mesmas tendências entre as duas tipologias.

(iii) a validade de se considerar o pavimento-tipo como representativo do desempenho da superestrutura para as perspectivas técnico-funcional e econômica, *mas não para desempenho ambiental*

Os indicadores de desempenho ambiental de pavimentos-tipo e superestruturas correspondentes não apresentaram a mesma tendência e, à exceção do *conteúdo não renovável* (NRC), *consumo de materiais* (Mc) e de energia incorporada não renovável ( $EE_{n\ ren}$ ), os valores obtidos nas duas situações não foram estatisticamente iguais. Quanto ao desempenho técnico-funcional, os valores dos indicadores *consumo de aço* e *consumo de concreto* para pavimentos-tipo e superestruturas correspondentes tiveram sua equivalência confirmada pela análise estatística. Finalmente, o CCV calculado no nível do pavimento-tipo representa o desempenho econômico da superestrutura, pois é função do consumo de materiais e os valores dos indicadores técnico-funcionais (consumo de aço e concreto) e ambientais (Mc, englobando fôrmas, e NRC) que o representam foram estatisticamente iguais (nível de significância de 5%) nas comparações feitas para os trinta e um casos.

Os resultados de CCV capturaram diferenças entre os estudos de caso; entretanto, ao se particularizar a comparação entre estruturas em concreto armado e em concreto protendido, à exceção dos custos de reparos (cerca de 72% do CCV), os custos de aquisição e o CCV foram estatisticamente iguais entre os dois grupos.

(iv) que, segundo o modelo utilizado pelo software *Life-365 v.2.1.1*, o dimensionamento estrutural para um ambiente marinho, com base na ABNT NBR 6118:2007, assim como no texto do 1º Projeto de revisão da NBR 6118: junho 2013, não garantiu conformidade com a ABNT NBR 15575:2013 quanto ao desempenho mínimo referente ao requisito de durabilidade ( $VUP_{\min}$  de 50 anos).

Como a VUP é o elemento definidor do equivalente funcional que baliza as avaliações de ciclo de vida ambiental e de custos, das estratégias apontadas pelo software para sanar esta deficiência, foram testados o aumento do cobrimento, o emprego do inibidor de corrosão  $Ca(NO_2)_2$  e a previsão de um cronograma de reparos, sendo esta última adotada para os estudos de casos.

(v) em relação a outras pesquisas no tema:

- Os percentuais correspondentes ao custo de aquisição e ao custo de manutenção e reparos em relação ao custo total obtidos para os estudos de caso desenvolvidos nesta tese (classe III, da ABNT NBR 6118:2007) foram bastante próximos dos valores encontrados nos CCV de edificações europeias, em que 17% a 25% do CCV correspondem aos custos de aquisição e 75 a 83% aos custos de manutenção e fim de vida útil. Para dimensionamentos em ambientes menos agressivos (classes I e II), a parcela correspondente aos custos de aquisição possivelmente aumentaria, devido à redução ou possível eliminação dos eventos de reparos dos sistemas estruturais no estágio de uso.
- Destaca-se a vantagem de utilização do inverso de dois indicadores técnico-funcionais usuais em projeto estrutural - *relação entre vão e altura* ( $\ell/h$ ) e *área de influência de pilares* ( $m^2_{AE}/n^{\circ} \text{ pilares}$ ). Utilizados desta forma -  $(h/\ell)/m^2_{AE}$  e  $n^{\circ} \text{ pilares}/m^2_{AE}$  (*densidade de pilares*) – uniformiza-se a interpretação da escala de desempenho dos demais indicadores técnico-funcionais, possibilitando sua agregação.
- Inúmeras questões prejudicam o posicionamento dos resultados de desempenho ambiental obtidos nesta pesquisa em relação aos dados de literatura internacional, como: (a) o fato de se explorar em países de clima frio e temperado, a elevada massa térmica do

concreto, por meio de espessuras maiores e peças mais robustas, promovendo isolamento térmico minimizando o consumo de energia operacional; e pelas diferenças entre (b) métodos de cálculo, (c) limites do sistema considerados nas ACV, (d) processos produtivos dos materiais, incluindo as diferenças entre matrizes energéticas dos países, (e) códigos estruturais, e (f) equivalência funcional na normalização, como por exemplo, área útil total de piso (*net floor area*, NFA), muito usual na literatura, em vez de área estrutural (AE), utilizada nesta tese. No âmbito de pesquisas nacionais, há poucos trabalhos comparáveis na literatura pelas mesmas razões, à exceção da primeira.

- A definição da unidade funcional deve ser feita cuidadosamente. Fixados 50 anos de vida útil de projeto (VUP) e o carregamento para uso residencial e comercial, a apresentação dos resultados dos indicadores por m<sup>2</sup> de área estrutural, como utilizada neste trabalho, alia a facilidade de coleta de dados nos escritórios de projeto e de realização de análises comparativas entre diferentes estruturas dentro de uma mesma tipologia, à capacidade de capturar aspectos de durabilidade e função estrutural defendidos na literatura de fronteira de conhecimento.
- Adicionalmente, observou-se que os indicadores técnico-funcionais permitiram esclarecer questões levantadas em pesquisas anteriores e demonstrar que não existe correlação entre adaptabilidade ao uso fornecida pela adoção de grandes vãos e pavimentos livres de pilares e uso excessivo de recursos. Constatou-se, também, o alinhamento e maior amplitude de aplicação destes indicadores em relação aos encontrados na literatura.

## 7.1 ASPECTOS A EXPLORAR EM PESQUISAS FUTURAS

Reconhece-se que o papel dos indicadores de desempenho é descrever as condições atuais e compará-las a valores de referência, a exemplo de metas ou resultados esperados, requerendo, portanto, o seu conhecimento prévio. Ressalta-se assim, a importância de avançar na obtenção destes valores, referentes não só ao desempenho de sistemas estruturais, mas de todos os sistemas construtivos da edificação, para que se possa definir metas de sustentabilidade para o ambiente construído, no contexto brasileiro.

Como principais aspectos a explorar, destacam-se:

- A necessidade de estudar e compreender melhor as interferências de decisões no âmbito do projeto estrutural no desempenho de outros subsistemas construtivos da edificação, para considerá-las adequadamente nas avaliações de desempenho ambiental e econômico destes sistemas construtivos e, conseqüentemente, da edificação como um todo.
- Na modelagem do ciclo produtivo do cimento CPIII-32 para a realização da ACV, nenhum critério para alocação de impactos entre o aço e a escória granulada de alto forno foi adotado. Alocação é uma questão metodológica reconhecidamente desafiadora na técnica de ACV, devido aos seus potenciais impactos nos resultados. Embora prevista na norma ISO 14040:2006, sua consideração não foi imperativa para os objetivos desta tese, além de fugir ao seu escopo. Reconhece-se, no entanto, tratar-se de importante lacuna a ser investigada em pesquisas futuras.
- Com relação aos aços de protensão, as ACV não foram completas, pois a graxa e película plástica que envolvem as cordoalhas de CP-190 não foram consideradas, em virtude do fabricante e executor dos serviços de protensão não ter disponibilizado os dados, que também não constavam nas bases de dados disponíveis. Recomenda-se intensificar a busca por dados melhores em pesquisas futuras para aumentar a acuidade dos resultados.
- Como consideração de caráter geral, no decorrer dos trabalhos tornou-se muito clara a necessidade de mais informação e uniformização da apresentação de quantitativos nas pranchas de projeto estrutural para facilitar a coleta de dados para cálculo dos indicadores.
- Ressalta-se, ainda, a necessidade de pesquisa sobre os processos e custos relacionados ao estágio de pós-uso do ciclo de vida da estrutura. Nenhum cenário de fim de vida, além dos indicadores técnico-funcionais que avaliam a facilidade de desconstrução, foi considerado para aplicação dos indicadores ambientais e o CCV nesta tese, para evitar que a inclusão de incertezas de dados comprometesse a confiabilidade de resultados da avaliação do sistema estrutural.
- Da análise da literatura, infere-se que a contribuição relativa à etapa de construção na carga ambiental total é muito pequena. Adicionalmente, com implementação de regulamentações para otimização ambiental na fase de uso, cresce a importância relativa das etapas de pré-uso e cenários de fim de vida. Particularmente, a destinação final do volume de resíduos de construção e demolição inerente ao sistema estrutural em concreto.

Uma avaliação completa da sustentabilidade de edificações deve englobar as dimensões ambiental, econômica e social, além da técnico-funcional. Entretanto, o avanço nas diferentes dimensões da sustentabilidade é desigual, devido a dificuldades relativas à integração da técnica de ACV - utilizada para avaliar desempenho ambiental - com metodologias de avaliação de impacto social, ainda embrionárias, a serem superadas pelo setor de construção civil em todo o mundo. Atualmente a comunidade científica mundial se mobiliza em direção à avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida (ASCV), que envolve a avaliação dos impactos negativos e benefícios ambientais, sociais e econômicos em processos de tomada de decisão para produtos mais sustentáveis em todo o seu ciclo de vida. Este conceito novo tem pela frente o desafio de integrar ACV, ACCV e ACV-S desenvolvendo uma metodologia capaz de acomodar técnicas desenvolvidas independentemente, em épocas distintas e com diferentes regras de cálculo, *frameworks* e terminologias.





## 8 REFERÊNCIAS

ABANDA, F.H., TAH, J.H.M., CHEUNG, F.K.T. Mathematical modelling of embodied energy, greenhouse gases, waste, time-cost parameters of building projects: a review. **Building and Environment**, v.59, p.23-37, 2013.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Editora Blucher, São Paulo, SP. 2011.

AHLROTH, S., NILSSON, M., FINNVEDEN, G., HJELM, O., HOCHSCHORNER, E. Weighting and valuation in selected environmental systems analysis tools e suggestions for further developments. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p.145-156, 2011.

ALEXANDER, M. G., BALLIM, Y., STANISH K. A framework for use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures. **Materials and Structures**, v.41, n.5, p. 921-936, 2008.

ALWAER, H.; CLEMENTS-CROOME, D. Key performance indicators (kpis) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings. **Building and Environment**, v.45, n.4, p.799-807, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 365 Service life prediction – State-of-the-Art Report. ACI Committee 365. **ACI 365.2R-00**. 2000.

ANDRADE, J., BRAGANÇA, L. Analysis of the impacts of economic and social indicators to sustainability assessment. **In: International Conference Sustainability of Constructions - Towards a better built environment**. February 3-5 2011, Innsbruck. **Proceedings...** vol.1. p.1-6, Austria, 2011.

ANDRADE, C., MARTÍNEZ, I. Use of indices to assess the performance of existing and repaired concrete structures. **Construction and Building Materials**, v.23, p.3012–3019, 2009.

AQUA. “**Edifícios habitacionais - Processo AQUA**”© FCAV – Fevereiro 2010 - Versão 1. Disponível em: [http://www.sustentech.com.br/arquivos/AQUA\\_Residencial.pdf](http://www.sustentech.com.br/arquivos/AQUA_Residencial.pdf). Acesso em: jul. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5674:1999**. Manutenção de edificações – Procedimento. Válida a partir de 1.11.1999. Rio de Janeiro. 6p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 6118:2007** Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Versão corrigida, em vigor a partir de 21.06.2007. Rio de Janeiro. 221p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 6120:1980** Cargas para o cálculo de estruturas das edificações. Rio de Janeiro. 5p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 6123:1988** Forças devidas ao vento nas edificações. Rio de Janeiro. 66p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 8681:2004**. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Esta versão corrigida da ABNT NBR 8681:2003 incorpora a Errata 1 de 31.03.2004. Confirmada em 09.05.2011. Rio de Janeiro. 18p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 14037:2011**. Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações - Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Publicada em 28.07.2011. Válida a partir de 28.08.2011. Rio de Janeiro. 16p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 14432:2001**. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro. 14p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 15200:2004**. Projeto de estrutura de concreto em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro. 17p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 15.575-1:2013**. Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. 2013. São Paulo – SP. Publicada em 19/02/2013. Válida a partir de 19/07/2013. 71p.

\_\_\_\_\_. ABNT. **NBR 15.575-2:2013**. Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. 2013. São Paulo – SP. Publicada em 19/02/2013. Válida a partir de 19/07/2013. 31p.

BARRINGER, H. P. A Life Cycle Cost Summary. **In:** International Conference of Maintenance Societies (ICOMS-2003). Perth, 2003. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.barringer1.com/pdf/LifeCycleCostSummary.pdf>. Acesso em: 09 maio 2013.

BAROGHEL-BOUNY, V.. Concrete design for structures with predefined service life-durability control with respect to reinforcement corrosion and alkali-silica reaction. State-of-the-art and Guide for The Implementation of a Performance-type and Predictive Approach based Upon Durability Indicators. **Documents Scientifiques and Techniques de l'AFGC**, 2004.

BATLOUNI NETO, J. Diretrizes do projeto de estrutura para garantia de desempenho e custo. **In:** ISAIA, G. C. (Editor). Concreto: ciência e tecnologia. 1ª ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v. 1, p. 127-156, 2011.

\_\_\_\_\_. Projeto de estruturas de concreto armado: diretrizes para otimização do desempenho e do custo do edifício. São Paulo, IPT, 2003. **Dissertação** (Mestrado em Habitação), IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. SP. 2003.

\_\_\_\_\_. A importância da tecnologia no setor imobiliário. **Coluna FIABCI/Brasil. O Estado de São Paulo**. São Paulo, 24 de dezembro de 2002, p. A-17.

BAUMANN, H., TILLMAN, A. **The hitch hiker's guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application**. Londres: Studentlitteratur, 543p., 2004.

BILEC, M., RIES, R.J., MATTHEWS, H.S. AND SHARRARD, A.L. Example of a hybrid life-cycle assessment of construction processes, **Journal of Infrastructure Systems - ASCE**. 2006. Disponível em: <<http://pubs.asce.org/copyright>>. Acesso em: 03 fev. 2010.

BILEC, M., RIES, R.J. and MATTHEWS, H.S. Life Cycle Assessment Modeling of Construction Processes for Buildings. **Journal of Infrastructure Systems – ASCE**. posted ahead of print oct. 2, 2009. Disponível em: <<http://pubs.asce.org/copyright>>. Acesso em: 03 fev. 2010.

BLEISCHWITZ, R., GILJUM, S., KUHNDT, M.,SCHMIDT-BLEEK F., et al. 2009. Eco-innovation - Putting the EU on the path to a resource and energy efficient economy. **Wuppertal Spezial 38**, Wuppertal Institut, Wuppertal.

BLUYSSSEN, P.M.;OOSTRA, M.A.R.; MEERTINS, D. A top down approach to improve IEQ while reducing energy consumption. **In: SB11 HELSINKI – World Sustainable Building Conference**. October 18-21, 2011. **Proceedings...** vol.2. p.36-37. Finland, 2011.

BORCHERS, M. Importance of structural engineering in sustainable and low carbon design. Technical note. **The structural engineer**, v.88, n.9, p.14-16, 2010.

BORGES, C. A. DE M.; SABBATINI, F. H. O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no brasil. **BT/PCC/515 - Boletim técnico EPUSP**, 19p. São Paulo, 2008.

BRAUNE, A., KITTELBERGER, S., KREISSIG, J. PE INTERNATIONAL AG | 01.10.2011. EPD 2.0 concept, a new way of integrating life cycle management. Whitepaper presented **in: SB13 Munich– Implementing Sustainability - Barriers and Chances**. 24-26. Apr.2013. Munich, Germany, 2013.

BRITISH STANDARD. EUROPEAN STANDARD. **BS EN ISO 14025:2010**. Environmental labels and declarations. Type III environmental declarations. Principles and procedures.

\_\_\_\_\_. **BS EN 15643-2:2011**. Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2: Framework for the assessment of environmental performance. 36p. English version. Incorporating corrigendum February 2012.

BUDAVARI, Z. SZALAY, Z., BROWN, N., MALMQVIST, T., PEUPORTIER, B., ZABALZA, B., KRIGSVOLL, G., WETZEL, C., CAI, X., STALLER, H., TRITTHART, W. **Indicators and weighting systems, including normalisation of environmental profiles**. LoRe-LCA-WP5-D5.1. Final version, 80p, 2011. Disponível em: <<http://www.sintef.no/Projectweb/LoRe-LCA/Training/>>. Acesso em: mar. 2013.

\_\_\_\_\_. **Methods and guidelines for sensitivity analysis, including results for analysis on case studies.** LoRe-LCA-WP5-D5.2. Final version, 46p, 2011a. Disponível em: <<http://www.sintef.no/Projectweb/LoRe-LCA/Training/>>. Acesso em: mar. 2013.

BURGER, E., GILJUM, S., MANSTEIN, C. and HINTERBERGER, F. Comprehensive ecological indicators for products: three case studies applying ecological rucksack (MIPS) and ecological footprint. [**presented paper**]. In: ESEE, 2009. Ljubljana, Slovenia. 15p. Disponível em: <<http://seri.at/wp-content/uploads/2009/09/Comprehensive-Ecological-Indicators-for-Products-Paper2.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2010.

BUYS, A., BENDEWALD, M., TUPPER, K. Life cycle cost analysis: is it worth the effort?. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning engineers, Inc. **ASHRAE Transactions**. v.117. Part 1. p.541-548, 2011.

CALKINS, M. **Materials for sustainable sites. A complete guide to evaluation, selection, and use of sustainable construction materials.** John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2009. 457p.

CASBEE-NC, JSBC 2010. Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency – for New Construction. Japan Sustainable Building Consortium. **Technical Manual**. 2010 edition. Tool 1.

CASER, Karla do Carmo; INO, Akemi. Avaliação de desempenho do protótipo “Moradia Ecológica” em taipa de mão com ossatura de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS EM MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EDUSP, 2000. 1 CD-ROM.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. CBIC. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013.** Fortaleza, 2013. 300p. Disponível em: <http://www.cbic.org.br/sala-de-imprensa/apresentacoes-estudos/norma-de-desempenho-3>. Acesso em: maio 2013.

\_\_\_\_\_.CBIC. **Boletim Estatístico.** Abril/2012, ANO VIII, N.º 04. Disponível em: <http://www.cbic.org.br>. Acesso em: jul. 2012.

**CENSO IMOBILIÁRIO SINDUSCON-ES. 2004 a 2010.** pdf. 626p.

CHANG, Y., RIES, R.J., WANG, Y. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: an economic input-output LCA model. **Energy Police**, v.38, p.6597-603, 2010.

CHEN, G.; CHEN, H.; CHEN, Z.; et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v.16, p.583-595, 2011.

CIB. **Working with the Performance Approach in Building.** CIB Report, Netherlands, n. 64, 1982.

CÓIAS, V. Building pathology related costs. **In:** FREITAS, V. P. (Editor) CIB – W086 Building Pathology. A state-of-the-art report on building pathology. CIB Publication 393. p.24-29, 2013.

COLE, R. J.; STERNER, E. Reconciling theory and practice of life-cycle Costing. **Building Research & Information**, London, v. 28, p. 368-375, 2000.

CREMONINI, Ruy Alberto. Levantamento da incidência de manifestações patológicas em componentes da edificação. **In:** SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ENTAC, 1998. p. 134-143.

CRISP – Construction and City Related Sustainability Indicators. EC FP5 CRISP indicator analysis PeBBu generic task 2, final report. CIBdf, the netherlands, october, 2005.

CROWHURST, D., CUNHA, A., HANS, J., HUOVILA, P., SCHMINCKE, E., VISIER, J.C. **SB Alliance, A Framework for Common Metrics of Buildings**, final report, 37p., 2010.

CUELLA-FRANCA, R.M., AZAPAGIC, A. Environmental impacts of the UK residential sector: life cycle assessment of houses. **Build Environ**, accepted manuscript, 2012.

DAVIES, R. **Green Value, Green Building, Growing Assets**. Report 2005. Disponível em <<http://www.ries.org/NR/rdonlyres/93B20864-E89E-4641-AB11-028387737058/0/GreenValueReport.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

DEBY, F., CARCASSES M., SELLIER, A. Toward a probabilistic design of reinforced concrete durability: Application to a marine environment. **Mater. Struct.**, v.42, n.10, p.1379-91, 2009.

DIXIT M.K., FERNANDEZ-SOLIS, J.L., LAVY S., CULP, C.H. Identification of parameters for embodied energy measurement : a literature review. **Energy Build**, v.42, p.1238-47, 2010.

DIXIT M.K., FERNANDEZ-SOLIS, J.L., LAVY S., CULP, C.H. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: a review paper. **Renew Sustain Energy Rev.**, v.16, p.3730-43, 2012.

DÖRING B., KUHNHENNE M., FELDMANN M. Floor Systems - Key Elements for Sustainable Multi-storey Buildings. **In:** SB11 HELSINKI – World Sustainable Building Conference. October 18-21, 2011. **Electronic Proceedings...** theme 1 – world resources, p.218-223. Finland, 2011.

EHLEN, M. A. LIFE-365 Service life prediction model, v.2.1 – **Users Manual**. USA, January, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “**Balço Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Síntese do Relatório Final**”, EPE, Rio de Janeiro, 2012. 53p.

ENERGY SAVING THROUGH PROMOTION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN BUILDINGS. ENSLIC - ARMINES - **WPR21-Rev5-State-of-the-art for use of LCA in building sector**. 75p. 2009.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. EEA. Environmental indicators: typology and overview. **Technical Report**, n.25. Smets, E. & Wetering, R. Copenhagen,1999. 19p.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. EEA. Core set of indicators: guide. **Technical Report**, n.01. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Copenhagen, 2005. 38p.

EUROPEAN STANDARD. EN 15804:2012 (E). Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. 51p. English version.

EUROPEAN STANDARD. EN 15978:2011 (E). Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. English version.

FABRYCKY, W.J.; BLANCHARD, B.S. **Life Cycle Cost and Economic Analysis**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.

FESANGHARY, M., ASADI, S., GEEMC, Z. W. Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. **Build Environ**. 49, p.245-50, 2012.

FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers**, 12th edition. New York, Hafner, 1954.

FINKBEINER, M., DOWDELL, D., INABA, A., YOUNG, S. B. World Steel Association. **Life Cycle Assessment Methodology Report**, 2011. Disponível em: <http://worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-Methodology-Report/document/LCA%20Methodology%20Report.pdf> >. Acesso em: mar. 2012.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p.1–21, 2009.

FOLVIK, K., WAERP, S. Development and use of environmental product declarations (epd) – knowledge based choice of building materials for sustainable design. **In: SASBE 2009**, University of Delft. **Proceedings...** v.1, p.1-8, 2009.

GARDNER, L., CRUISE, R. B., SOK, C. P., KRISHNAN, K. SANTOS, J.M. Life cycle costing of metallic structures. **Engineering Sustainability**, v.160, Issue ES4, p.167-177, 2007.

GERAEDTS, R. Future value of buildings. **In: SASBE 2009**, University of Delft. **Proceedings...** p1-8, 2009.

GIBBERD, J. Building interventions to support the achievement of human development index (HID) and ecological footprint (EF) targets. **In:** SASBE 2009, University of Delft. **Proceedings...** v1, p.1-7, 2009.

GIJSBERS, R., LICHTENBERG, J., ERKELENS, P. A new approach to flexibility-in-use : adaptability of structural elements. **In:** SASBE, 2009, **Proceedings...** p.1-9. University of Delft, The Netherlands, 2009.

GILJUM, S., HINTERBERGER, F., WACKERNAGEL, M., KITZES, J. **Resource use indicators in the European Union. Policy processes, indicator sets and criteria for a headline indicator.** Aachen Foundation Kathy Beys: Aachen, Germany, 2006.

GOEDKOOP, M., SCHRYVER, A., OELE, M., DURKSZ, S., ROEST, D. **Introduction to LCA with SimaPro 7**, 2010 . Disponível em: <http://www.pre.nl>. Acesso em: Jan. 2012.

GOEDKOOP, M., OELE, M., SCHRYVER, A., VIEIRA, M., HEGGER, S. **SimaPro Database Manual: Methods Library**, 2010a. Disponível em: <http://www.pre.nl>. Acesso em: Jun2012.

GOGGINS, J., KEANE, T., KELLY, A. The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland. **Energy Build**, v.42, p.735-44, 2010.

GYADU-ASIEDU, W. The elements in sustainable construction industry: building criteria and indicators for performance assessment. **In:** SASBE 2009, University of Delft. **Proceedings...** v.1, p.1-8, 2009.

HAAPIO, A.; VIITANIEMI, P. Environmental effect of structural solutions and building materials to a building. **Environmental Impact Assessment Review**, v.28, p.587-600, 2008.

HACKER J.N., DE SAULLES, T.P., MINSONC, A.J., HOLMES, M.J. Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change, ARUP Report, **Energy and Buildings**, v.40, p. 375-384, 2008.

HABERT, G., ROUSSEL, N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. **Cement & Concrete Composites**, v.31, p.397-402, 2009.

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**, v.35, p.250-262, 2012.

HÄKKINEN, T.; HUOVILA, P.; BOURDEAU, L.; NIBEL, S. CRISP NETWORK on Construction and City related Sustainability Indicators: Structuring of indicators and status of work. **In:** Sustainable Building 2002 (SB02). **Proceedings...** Oslo, 2002. 6p.

HAKKINEN, T.; VARES, S. Sustainability and LCA assessment for a passive house kindergarten. **In:** World Sustainable Building Conference - SB11 HELSINKI, 18-21.oct.2011. **Electronic Proceedings...** v.1, p.1-8, Finland, 2011.

HAKKINEN, T. Systematic method for the sustainability analysis of refurbishment concepts of exterior walls. **Construction and Building Materials**, v. 37, p.783–790, 2012.

HÄKKINEN, T.; ANTUÑA, C., MÄKELÄINEN, T., LÜTZKENDORF, T., BALOUKTSI, M., IMMENDÖRFER, A., NIBEL, S., BOSDEVIGIE, B., LEBERT, A., FIES, B., IÑARRA, P.H., LUPISEK, A., HAJEK, P., SUPPER, S., ALSEMA, E., DELEM, L., VAN DESSEL, J. **Sustainability and performance assessment and benchmarking of building**. SuPerBuildings – Final report. Tarja Häkkinen (Ed.). Espoo 2012. VTT Technology 72. 409 p. + app. 49 p.

HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon & Energy (ICE)**. Version 2.0. Sustainable Energy Research Team (SERT). Department of Mechanical Engineering. University of Bath, Bath, UK, 2011.

HANDLER, B. **A Systems Approach to Architecture**. Nova York: American Elsevier Publishing Company, 1970. 183p.

HANS, J., NIBEL, S., CRIBELLIER, A.C., SCHMINCKE, F.E., LENZ, K., AHVENNIEMI, H., HUOVILA, P., HAKKINEN, T., VICARIO, T.S., CARMINATI, M.B., HORST, S., PYKE, C., KUZIAMKO, J., RIGGS, L., SOBOLA, J., VONKA, M. **SB Alliance, Piloting SBA Common Metrics**. Phase 1, Final report, outubro de 2012, 120p.

HAROGLU, H., GLASS, J and THORPE, T. A study of professional perspectives on structural frame selection. **Construction Management and Economics**, v.27, n.12, p.1209-1217, 2009.

HARTKOPF, V., YANG, X., AZIZ, A. **Case studies of high performance sustainable buildings**. UNEP - SBCI. Carnegie Mellon University, 203p, January, 2009.

HEIJUNGS, R., SETANNI, E., GUINÉE, J. Toward a computational structure for a life-cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC. **Int. J Life-cycle Assess**. DOI: 10.1007/s11367-012-0461-4, July, 2012.

HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K.; ALDAYA, M.M.; MEKONNEN, M.M. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. London, UK: Earthscan Ltd., 203 p., 2011.

HONG, T., JI, C., PARK, H. Integrated model for assessing the cost and CO<sub>2</sub> emission (IMACC) for sustainable structural design in ready-mix concrete. **Journal of Environmental Management**, 103, p. 1-8, 2012.

HOPFE, C. J. **Uncertainty and Sensitivity Analysis in Building Performance Simulation for Decision Support and Design Optimization**. 2009. 215 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculty of Architecture, Building and Planning, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2009.

IDRUS, A. B., NEWMAN, J. B. Construction related factors influencing the choice of concrete floor systems. **Construct Manage Econ**, v. 20, p.13-19, 2002.



IDRUS, A. B., NEWMAN, J. B., IFESS: a computer tool to aid structural engineers at the conceptual design stage. **Construction and Innovation**, v.3, p.127-143, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção - PAIC, 2011**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/PAIC2011.pdf>. Acesso em: jun. 2013.

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the **Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [HOUGHTON, J.T., DING, Y., GRIGGS, D.J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.J., DAI, X., MASKELL, K., and JOHNSON, C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881p.

IPCC, 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the **Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Core Writing Team, PACHAURI, R.K. and REISINGER, A. (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 104p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. ENERGY CONSERVATION IN BUILDINGS AND COMMUNITY SYSTEMS - **IEA ECBCS ANNEX 57**. 1<sup>st</sup> Meeting of Annex 57. Evaluation of Embodied Energy and Carbon Dioxide Emissions for Building Construction. 16.out.2011. Espoo, Finland, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **Standard 6240**. Performance standards in building - Contents and presentation. 1980. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO. **Standard 6241**. Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered. 1984. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO. **Standard 9699**. Performance standards in building - Checklist for briefing -- Contents of brief for building design. 1994. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO. **Standard 14.040**. Environmental management – Life-cycle assessment: Principles and framework. 2006. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO. **Standard 15392**. Sustainability in building construction -- General principles. 2008. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO. **Standard 15686-5** - Buildings and constructed assets — Service-life planning — Part 5: Life-cycle costing. 2008. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO. **Standard 15686-10** - Buildings and constructed assets -- Service life planning -- Part 10: When to assess functional performance. 2010. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO/TS. **Technical Specification 21929-1**. Sustainability in building construction -- Sustainability indicators -- Part 1: Framework for development of indicators for buildings. 2006. Genève, Switzerland.

\_\_\_\_\_. ISO. **Standard 21931-1**. Sustainability in building construction – Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works -- Part 1: Buildings. 2010. Genève, Switzerland.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, v. 4, p. 19-30, 2004.

JACOBS, J. P. ed. Sustainable benefits of concrete structures. 2009. 40p. ECP. European Concrete Platform ASBL. Disponível em :<http://www.europeanconcrete.eu>. Acesso em: 20 set. 2013.

JEONG, I. T., LEE, K. M. Assessment of the ecodesign improvement options using the global warming and economic performance indicators. **J Clean Product**, v.17, p.1206-1213, 2009.

JUNG, H., PARK, H. M., KIM, J. H., KIM, G., KONG, J. S. Development of a probabilistic life-cycle cost model for marine structures exposed to chloride attack based on Bayesian approach using monitoring data. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v.17, n.5, p.1073-1082, 2013.

JUNNILA, S., HORVATH, A., AND GUGGEMOS, A. Life-cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the U.S. **J. Infrastruct Syst, ASCE**, v.12, n.1, p.10-17. 2006.

KALLAOS, J. Indicators for a sustainable built environment. **In: CIB World Congress 2010 – Building a better world. Proceedings...** Salford, UK, 2010.

KANELLOPOULOS, A., PETROU, M. F., IOANNOU, I. Durability performance of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 37, p.320–325, 2012.

KATS, G. **The Cost and Financial Benefits of Green Buildings**: a report to California's sustainable building task force. Sacramento, CA: Sustainable Building Task Force, 2003. Disponível em <<http://www.calrecycle.ca.gov/greenbuilding/design/costbenefit/report.pdf>>. Acesso em: 12 jan, 2011.

KATS, G. **Greening America's Schools: costs and benefits. A Capital E Report**, Out.2006. 24p. Disponível em:<<http://www.usgbc.org/ShowFile.aspx?DocumentID=2908>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

KELLENBERGER, D.; ALTHAUS, H. Relevance of simplifications in LCA of building components. **Build Environ**, v. 44, n. 4, p. 818-825, 2009.

KHASREEN, M. M.; BANFILL, P. F. G.; MENZIES G. F. Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. **Sustainability 2009**. v 1, p.674-701. Disponível em: [www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability). Acesso em: 09 maio 2012.

KIBERT, Charles J. Progress in the design and deployment of net zero energy buildings in the US. **In: World Sustainable Building Conference - SB11 HELSINKI**, 18-21.oct.2011. **Electronic Proceedings...** theme 4 - Sustainable processes and eco-efficient technologies, p.955-965, Finland, 2011.

KONIG, H., CRISTOFARO, L. D. Benchmarks for life cycle costs and life cycle assessment of residential buildings. **Build Res Inform**, v.40(5), p.558-580, 2012.

KORPI, E.; ALA-RISKU, T. Life cycle costing: a review of published case studies. **Manage Audit J**, v.23, n.3. p.240-261, 2008.

KRAUSE, U., GROSSHANDLER, W., GRITZO, L. The International FORUM of Fire Research Directors: A position paper on sustainability and fire safety. **Fire Safety J**, v.49, p.79–81, 2012.

KRONKA, Roberta. Arquitetura, sustentabilidade e meio ambiente. **In: ENCONTRO NACIONAL, 2.; ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1.**, 2001, Canela, RS. **Anais...** Canela, RS: ANTAC, 2001. p. 67-72.

KWON, S. J., NA, U. J., PARK, S. S., JUNG, S. H. Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. **Structural Safety**, v.31, n.1, p.75-83, 2009.

LAEFER, D. F., MANKE, J. P. Building Reuse Assessment for Sustainable Urban Reconstruction. **J. Constr. Eng. Manage.** v.134, p. 217-227, 2008.

LANGDON, Davis. **Costing of Green Revisited: reexamining the feasibility and cost impact of sustainable design in the light of increased market adoption.** 2007. 25p. Disponível em: <<http://www.davislangdon.com/upload/images/publications/USA/The%20Cost%20of%20Green%20Revisited.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2011.

LANGDON, D. DAVIS LANGDON MANAGEMENT CONSULTING. **LCC as a contribution to sustainable construction, a common methodology.** London: Davis Langdon & Co. 2007a.

LANGSTON, C., WONG, F. K. W., HUI, E. C. M., SHEN, L. Y. Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. **Build Environ**, v.43, p.1709–1718, 2008.

LI, D.Z., HUI, E.C.M., LEUNG, B.Y.P., LI, Q.M., XU, X. A methodology for eco-efficiency evaluation of residential development at city level. **Build Environ.** v.45. p.566-573. 2010.

LI, C.S., GUO, S.J. Life cycle cost analysis of maintenance costs and budgets for university buildings in Taiwan. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v.11, n.1, p.87-94, 2012.

LIPPIATT, Barbara. BEES 1.0. **Building for Environmental and Economic Sustainability. Technical manual and user guide.** NIST national Institute Standards and Technology – U. S. Department of commerce technology administration. NISTIR 6144. U. S. 1998.

LIPPIATT, B. C.; HELGESON, J. F. Metrics and tools for cost-effective green buildings. **In: 3rd CIB International Conference on Smart and Sustainable Built Environment – SASBE, 2009. Proceedings...** v.1, p.1-9.

LOPEZ-MESA, B., PITARCH, A., GALLEGO, T., TOMAS, A. Comparison of environmental impacts of building structures with in situ cast floors and with precast concrete floors. **Build Environ**, v.44, n.4, p.699-712, Elsevier, 2009.

VAN DER LUGT, P., DOBBELSTEEN, VAN DEN A.A.J.F., JANSSEN, J.J.A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures, **Construct Build Mat**, v.20, n.9, p.648-656, 2006.

LUETZKENDORF, T., HAJEK, P., LUPISEK, A., IMMENDOERFER, A., NIBEL, S., HAKKINEN, T. Next generation of sustainability assessment – top down approach and stakeholders needs. **In: World Sustainable Building Conference - SB11 HELSINKI**, 18-21.oct.2011. **Electronic Proceedings...** theme 4 - Sustainable processes and eco-efficient technologies, p. 359-374, Finland, 2011.

MALMQVIST, T., GLAUMANN, M. Selecting problem-related environmental indicators for housing management. **Build Res Inform**, v.34, n.4, p.321-333, 2006.

MALMQVIST, T., GLAUMANN, M., SCARPELLINI, S., ZABALZA, I., ARANDA, A. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines, doi:10.1016 / j.energy.2010.03.026. **Energy**, v.36, Iss.4, p.1900–1907, 2011.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other". **Annals of Mathematical Statistics**, v.18, n.1, p.50–60, 1947.

MARSHALL, H. E.; PETERSEN, S. R. Life-Cycle Costing. **In: Mechanical estimating guidebook for building Construction**. McGraw-Hill, Inc. 6<sup>a</sup> ed. S.I., 1995. Chapter 27. p.407-417.

MELAVAR, M.; PHYLLIS, M. **The Green Bottom Line: the real cost of sustainable building**. Estados Unidos: McGraw Hill Companies, 2009. 359 p.

MINX, J., WIEDMANN, T., BARRET, J., SUH, S. Method review to support the PAS process for the calculation of the greenhouse gas emissions embodied in goods and services. **Report to the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs** by Stockholm Environment Institute at the University of York and Department for Biobased Products at the University of Minnesota, London: DEFRA, 2007

MITIDIARI FILHO, Cláudio Vicente. **Avaliação de desempenho de componentes e elementos construtivos inovadores destinados a habitações: proposições específicas à avaliação de desempenho estrutural**. 1998. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MONAHAN, J., POWELL, J.C. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: a case study using a lifecycle assessment framework. **Energy Build**, v.43, p.179-88, 2011.

MOON, K. S. Sustainable design of tall building structures and façades. In: SASBE 2009, **Proceedings...** v.1, p. 1- 8, 2009.

MÜLLER, H. S., VOGEL, M., HAIST, M. Service life design – A tool for sustainable application of concrete. Lead Paper. **In:** SB13 Munich – Implementing Sustainability - Barriers and Chances. 24-26.Apr.2013. **Proceedings...** p.56-69, Munich, Germany, 2013.

MYLES H., DOUGLAS A. W. **Nonparametric Statistical Methods**, (2<sup>nd</sup> ed.), Wiley-Interscience, 1999.

NEMRY, F., UIHLEIN, A., COLODEL, C., WETZEL, C., BRAUNE, A., WITTSTOCK, B., HASANC, I., KREISSIG, J., GALLOND, N., NIEMEIER, S., FRECH, Y. Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs. **Energy and Buildings**, 42, P.976–984, 2010.

NGANGA, G., ALEXANDER, M., BEUSHAUSEN, H. Practical implementation of the durability index performance-based design approach. **Construct Build Mat**, v.45, p.251–61, 2013.

NIELSEN, C.V. Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective. **Proceedings...** NRMCA 2008 Concrete Technology Forum, p.1-14, Denver, USA, 2008.

NORNES, D. **Use of Life Cycle Costing in the U.S. Green Building Industry**. 663 p. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Department of Construction Management, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2005.

NORRIS, G.A.; MARSHALL, H.E. Multi attribute decision analysis method for evaluating buildings and building systems. **NISTIR 5663**. National Institute of Standards and Technology – NIST, Gaithersburg. 77p. 1995.

NOGUEIRA, C. G., LEONEL, E. D. Probabilistic models applied to safety assessment of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress. **Engineering Failure Analysis**, v.31, p. 76–89, 2013.

OCHSENDORF, J., NORFORD, L. K., BROWN, D., DURSCHLAG, H., HSU, S. L., LOVE, A., SANTERO, N., SWEI, O., WEBB, A., WILDNAUER, M. Methods, impacts, and opportunities in the concrete building life cycle. **Research Report R11-01**. Department of Civil and Environmental Engineering. Concrete Sustainability Hub. Massachusetts Institute of Technology, 2011.

OECD. ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **Core set of indicators for environmental performance reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment**. Environment monographs, n.83.1993.

\_\_\_\_\_. **Environmental Indicators: Development, Measurement and Use**. OECD, Paris, 2003.

\_\_\_\_\_. **Key Environmental Indicators**. Environment Directorate, Paris, France, 2008.

OPEN HOUSE. Benchmarking and mainstreaming building sustainability across the EU based on transparency and openness (open source and availability) from model to implementation. **NEWSLETTER 2**, february, 2013. Disponível em: <http://www.openhouse-fp7.eu/>. Acesso em: mar. 2013.

ORTIZ, O., BONNET C., BRUNO, J. C., CASTELLS, F. Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain. **Building and Environment**, v.44, p. 584–594, 2009.

ORTIZ, O., PASQUALINO, J. C., DÍEZ, G., CASTELLS, F. The environmental impact of the construction phase: An application to composite walls from a life cycle perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v.54, p. 832–840, 2010.

PEREZ – GARCIA, J.; LIPPKE, B.; BRIGGS, D.; WILSON, J.B.; BOYER, J.; MEIL, J. The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction. **Wood fiber Sci**, 2005; Disponível em: <<http://www.corrim.org/reports/2005/swst/3.pdf>>. Acesso em: out. 2010.

PONCE, A.D., BEKIERSKI, D., BERNET, J. SB Alliance, Green Impact, december 2012. Green Impact, Environmental assessment and financial performance, **final report**, 72p., 2012.

PONS, O., WADEL, G. Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia. **Habitat International**, v.35, p.553-563, 2011.

PONS, O., AGUADO, A. Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain. **Building and Environment**, v.53, p. 49-58, 2012.

PUETTMANN, M.; WILSON, J. Life-cycle analysis of Wood products: cradle-to-gate LCI of residential building materials. **Wood Fiber Sci**, 2005. Disponível em: <<http://www.corrim.org/pubs/reports/2005/swst/18.pdf>>. Acesso em: out. 2010.

PURNELL, P. Material Nature versus Structural Nurture: The Embodied Carbon of Fundamental Structural Elements. **Environ. Sci. Technol**, v.46, p. 454–461, 2012.

RAJAGOPALAN, N., BILEC, M. M., LANDIS, A. E. Life cycle assessment evaluation of green product labeling systems for residential construction. **Int J Life Cycle Assess**, v.17, p. 753-763, 2012.

REAP, J., ROMAN, F., DUNCAN, S., BRAS, B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: goal and scope and inventory analysis. **Int J Life Cycle Assess**, v.13, p.290–300, 2008.

REYNDERS, G., NUYTTENA, T., SAELENS, D. Potential of structural thermal mass for demand-side management in dwellings. **Building and Environment**, v.64, p.187-199, 2013.

REZA, B.; SADIQ, R.; HEWAGE, K. Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: an AHP-based life cycle analysis. **Construct Build Mat.** v.25. n.4, p.2053-66. Elsevier. 2011.

ROSSI, B.,MARIQUE, A.F., REITER, S. Life-cycle assessment of residential buildings in three different european locations, case study. **Build Environ**, v.51, p.402-407, Elsevier, 2012.

ROYUELA, M. A. Los Sistemas de Indicadores Ambientales y su Papel em la Informaión e Integración Del Medio Ambiente. **In: I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Anais...**v1, p.1231-1256. 2001.

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; SILVA, V. G. Application of LCA in the construction sector: considerations on impact allocation in steelmaking processes and its reflection on the cement industry. **In: World Sustainable Building Conference- SB11, Helsinki, 18-21.oct.2011. Eletronic Proceedings...** theme 1- world resources, p.319-326, Finland, 2011.

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; SILVA, V. G. Proposition and preliminary analysis of a core set of indicators to describe material eco-efficiency of Brazilian buildings. **In: 4<sup>th</sup> CIB International Conference on smart and sustainable built environments. SASBE 2012. june, 28-30, SP. Proceedings...**v1, p1-8. Brazil, 2012.

SAATY, T.L. Multicriteria Decision Making: the Analytic Hierarchy Process. **AHP Series Vol. 1, RWS Publications**, Pittsburgh, PA. 1990.

SAETTA, A., SCOTTA, R., AND VITALIANI, R. 1993. "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete." **ACI Materials Journal**, v. 90, n.5, p. 441-451.

SANTOS, L. J. C. **Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usina de açúcar.** Tese (Doutorado). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade São Paulo, EPUSP, 227p. São Paulo, 2007.

SANTOS, L. J. C.; TENÓRIO, J.A.S. Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar. **Revista Escola de Minas.** v.63 n.1. Ouro Preto. Jan./Mar. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672010000100030>. Acesso em: 23 mar. 2012.

SCHEUER, C.; KEOLEIAN, G.A.; REPPE, P. Life-cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. **Energy Build**, v. 35, iss.10. p.1049-64, 2003.

SCHMIDT-BLEEK, F. "Toward Universal Ecology Disturbance Measures", **Regulatory, Toxicology and Pharmacology**, Vol 18, No. 3., Academic Press Inc., December 1993 (The Wuppertal Position Paper, Mid-1992, in a translated form).

SCHMIDT-BLEEK, F. **The earth- natural resources and human intervention**, Haus publishing, London, UK, 220p. 2009.

SEGNESTAM, L. **Indicators of Environmental and Sustainable Development: Theories and Practical Experiences**. World Bank, Washington DC, 2002.

SHI, X., XIE, N., FORTUNE, K., GONG, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v.30, p.125–138, 2012.

SIDERIS, K. K., ANAGNOSTOPOULOS, N. S. Durability of normal strength self-compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v.41, p.491–497, 2013.

SILVA, M. G. (coordenadora). Concreto de Alto Desempenho com Elevados Teores de Escória de Alto Forno: Estratégia para consolidar o Mercado da Escória de Alto Forno. Projeto Desempenho. **Relatório Técnico**. Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas (NEXES). Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo. 254p. ES, 2006.

SILVA, M. G.; SILVA, V., G.; RODRIGUES, G. L. C.; POLESE, M. O. **Propriedades, normalização e tendências na adição de escória de alto-forno em cimentos e concretos**. Boletim Técnico, Núcleo de Excelência em Escórias Siderúrgicas, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, 106p. 2006.

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Minererais. **In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. ISAIA, G. C. (Editor), 2ª Edição Atualizada e Ampliada, p.791-824, 2010.

SILVA, M. G., GOMES, V., TANESI, J. Uma análise crítica sobre a vida útil e a durabilidade na NBR 6118/2003. **Ibracon Concreto & Construções**. N.58, p.96-101, 2010.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edificações de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. Tese (Doutorado). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade São Paulo, EPUSP, 210p. São Paulo, 2003.

SILVA, V. G.. Indicadores de sustentabilidade de edificações: estado da arte e desafios para desenvolvimento no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 1, p. 47-66, 2007.

SILVA, V. G., PARDINI, A. F. Contribuição ao entendimento da aplicação da certificação LEED™ no Brasil com base em dois estudos de caso. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 3, p. 81-97, jul./set. 2010.

SILVA, V. G., SILVA, M. G. . Intensidade de energia e carbono incorporados em materiais e componentes de construção: definição inicial de benchmarks brasileiros. **In: VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica CITENEL: Inovação com responsabilidade: Superando barreiras e agregando valor**. **Anais...** v. 1. p. 1-10. Rio de Janeiro, 2013.

SMUTNY, R.; NEURURER, C.; TREBERSPURG, M. Sustainability Evaluation of Viennese housing estates in passive house standard – a post occupancy reflexion. **In: SB11 HELSINKI –**



World Sustainable Building Conference. October 18-21, 2011. **Proceedings...** vol.2. p.242-243. Finland, 2011.

SOETANTO, R.; DAINTY, A. R. J.; GLASS, J.; PRICE, A. D. F. Criteria for assessing the potential performance of hybrid concrete structural frames. **Eng Construct Architect Manage**, v. 11, n. 6, p. 414–425, 2004.

SOETANTO, R.; DAINTY, A. R. J.; GLASS, J.; PRICE, A. D. F. A framework for objective structural frame selection. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. **Structures & Buildings**, 159.Issue SBI, p. 45-52, 2006.

SPENCE, Robin; MULLIGAN, Helen. Sustainable development and the construction industry. **Habitat Journal**, Cambridge, v. 19, n. 3, p. 279-292, 1995. Disponível em: < <http://www.periodicos.gov.br> >. Acesso em: 12 ago. 2001.

**STATISTICA 10**, Versão 10.0.1011.0 (data analysis software system), 2010. StatSoft Inc, Tulsa, OK, USA.

STURGIS, S., ROBERTS, G. **Redefining zero: carbon profiling as a solution to whole life carbon emission measurement**. UK: The Royal Institution of Chartered Surveyors, 2010.

SUH, S., LIPPIATT, B. C. Framework for hybrid life cycle inventory databases: a case study on the Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) database. **Int. J Life Cycle Assess**. v.17, p.604–612, 2012

**TABELA CUSTOS REFERENCIAIS** (ls=129,88%; bdi=28%) LABOR/CT-UFES padrão IOPES fev/2013. Disponível em: <http://siteiopes.no-ip.info/>. Acesso em: 15 mar. 2013.

TANESI, J. Contribuição ao desenvolvimento de especificações por desempenho para concretos com escória de alto forno. **Tese (Doutorado)** – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 319p. Campinas, Brasil, 2010.

TANESI, J., SILVA, M. G., GOMES, V., CAMARINI, G. From prescription to performance: international trends on concrete specifications and the Brazilian perspective. **Ibracon Struct Mat J**. v.3, n.4, p. 420 – 431, 2010.

TANESI, J., SILVA, M. G., GOMES, V. Guidelines for the development of concrete performance-based specifications in Brazil. **Ibracon Struct Mat J**. V.5, N.2, 2012. p. 219 – 228.

THORMARK, C. The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. **Building and Environment**, v.41, p.1019-1026, 2006.

TOLLER S., FINNVEDEN G., WADESKOG A., MILIUTENKO S. Indicators For Environmental Monitoring Of The Swedish Building And Real Estate Management Sector. **In: World Sustainable Building Conference- SB11**, Helsinki, 18-21.oct.2011. **Electronic Proceedings...** theme 1- world resources, p.181-187, Finland, 2011.

TREBERSPURG, M.; DJALILI, M. Austria House, the first passive house for the 21<sup>st</sup> Olympic winter games 2010 in Canada. **In: SB11 HELSINKI – World Sustainable Building Conference.** October 18-21, 2011. **Proceedings...** vol.2. p.96-97. Finland, 2011.

TRELOAR, G. J. Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output based hybrid energy analysis method. **Econ Syst Res**, v.9,p.375-91, 1997.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Ph.D. thesis.** Stockholm (Sweden): Swedish Cement and Concrete Research Institute; 1982. 469 p.

UNITED NATIONS. UN ST/ESCAP/2561 – **Eco-efficiency indicators: measuring resource-use efficiency and the impact of economic activities on the environment.** 28p. Thailand, 2009. Disponível em: <http://www.unescap.org/esd>>. Acesso em: ago. 2010.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. UNEP. DEW/1076/PA. **Latin America and The Caribbean: Environment outlook.** GEO LAC 3. 380p. 2010.

\_\_\_\_\_. UNEP/SETAC, 2009. **Life cycle initiative. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products.** UNEP, Paris, 103p. 2009.

\_\_\_\_\_. UNEP/SETAC, 2011. **Life cycle initiative. Towards a life cycle sustainability assessment. Making informed choices on products.** UNEP, Paris, 86p. 2011.

VAN DEN DOBBELSTEEN, A.A.J.F., ARETS, M., VAN DER LINDEN, A. C. Smart Sustainable office design – effective technological solutions, based on typology and case studies. **In: Smart & sustainable built environments. Part 1 – creating smart and sustainable cities.** Blackwell publishing. p. 3-13, 2005.

VAN DEN DOBBELSTEEN, A.A.J.F., ARETS, M. and NUNES, R. Sustainable design of supporting structures. Optimal structural spans and component combinations for effective improvement of environmental performance. **Construct Innov**, v.7.n. 1. p.54-71, Emerald, 2007.

VAN DEN HEEDE, P.; BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 431-442, 2012.

WEYERS, R. E., PYC, W., SPRINKEL, M. M. Estimating the Service Life of Epoxy Coated Reinforcing Steel, **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 5, p. 546-557, 1998.

WEYERS, R. E., FITCH, M. G., LARSEN, E. P., AL-QUADI, I. L., CHAMBERLIN, W. P., HOFFMAN, P. C. **Concrete Bridge Protection and Rehabilitation: Chemical Physical Techniques, Service Life Estimates, SHRP-S-668,** Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 357 p, 1993.

WILCOXON, F. "Individual comparisons by ranking methods". **Biometrics Bulletin 1** v.6, p. 80–83, 1945.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso - planejamento e métodos**. 4ª edição. Porto Alegre, Bookman, 2010.

YUNUS, R., YANG, J. Critical sustainability factors in industrialized building systems. **Construct Innov: Inform, Proc, Manage**, v.12, Iss.4, p.447-463, Emerald, 2012.

ZABALZA, B. I., CAPILLA, A.V., USON, A.A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Build Environ**, v.46, p.1133-1140, 2011.





## APÊNDICE A - PRINCIPAIS CENTROS DE REFERÊNCIA, INICIATIVAS, ORGANIZAÇÕES, PAÍSES ENVOLVIDOS E DOCUMENTOS PRODUZIDOS SOBRE INDICADORES PARA A CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

O Quadro A.1 mostra alguns dos principais centros de referência, de âmbito mundial, sobre indicadores, enquanto o Quadro A.2 destaca as principais iniciativas, organizações e países envolvidos e os principais documentos produzidos sobre indicadores para a construção sustentável.

**Quadro A.1 - Principais centros de referência, em nível mundial, no tema indicadores**

Países	Principais Centros de Referência
<b>Alemanha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Germany</li> <li>▪ Karlsruhe institute of Technology – KIT, Germany</li> <li>▪ CalCon Holding GmbH</li> </ul>
<b>Áustria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sustainable Europe Research Institute (SERI), Vienna;</li> <li>▪ Factor 10 Institute, Vienna;</li> <li>▪ IFZ - Inter-University Research Centre for Technology, Work and Culture, Graz</li> </ul>
<b>Brasil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP</li> <li>▪ Universidade Estadual de São Paulo, USP</li> <li>▪ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo</li> <li>▪ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR</li> </ul>
<b>Bulgária</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SEC - Sofia Energy Centre</li> </ul>
<b>Canadá</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ iiSBE - International Initiative for a Sustainable Built Environment.</li> <li>▪ GBC- Green Building Challenge (projeto internacional que envolve mais de 15 países)</li> <li>▪ Environmental Research Group, School of Architecture, University of British Columbia, Vancouver;</li> <li>▪ Athena Sustainable Materials Institute</li> </ul>
<b>Dinamarca</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SBI (Danish Building Research Institute)</li> <li>▪ EEA (European Environment Agency)</li> <li>▪ DTI (Danish Technological Institute – Building Technology – Concrete Centre for Environmental Technology)</li> </ul>
<b>Espanha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Fundación CIRCE – Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos</i></li> </ul>

**Quadro A.1 - Principais centros de referência, em nível mundial, no tema indicadores (cont.)**

Países	Principais Centros de Referência
<b>Estados Unidos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology (NIST), USA</li> <li>▪ Yale University, New Haven, Connecticut, USA</li> <li>▪ Department of Civil and Environmental Engineering, UC Berkeley, USA</li> <li>▪ Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA</li> </ul>
<b>Finlândia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Helsinki University of Technology</li> <li>▪ Finish Environment Institute</li> <li>▪ VTT Technical Research Centre of Finland;</li> <li>▪ Helsinki University of Technology, Laboratory of Environmental Protection</li> <li>▪ Helsinki University of Technology, Laboratory of Wood Technology</li> </ul>
<b>França</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ OECD Environmental Directorate</li> <li>▪ Factor 10 Institute, Carnoules</li> <li>▪ CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment)</li> <li>▪ ARMINES- Centre for Energy and Processes, Ecole des Mines de Paris</li> </ul>
<b>Holanda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Delft University of Technology, Delft</li> <li>▪ Eindhoven University of Technology, Eindhoven</li> <li>▪ Nuon Tecno, Duiven</li> <li>▪ Polytechnic University Zuyd, Heerlen</li> <li>▪ ECOFYS – (Dutch company)</li> </ul>
<b>Hungria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ EMI - Non-profit Company for Quality Control and Innovation in Building</li> </ul>
<b>Noruega</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SINTEF – instituto de pesquisa norueguês</li> </ul>
<b>Reino Unido, UK</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ The University of Dundee, UK</li> <li>▪ School of Construction Management &amp; Engineering, The University of Reading, UK</li> <li>▪ Loughborough University, Leicestershire, UK</li> <li>▪ Coventry University, UK</li> <li>▪ Associate Sustainability Consultant at WSP Buildings, London, UK</li> <li>▪ Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Imperial College Road, London SW7 2BU, UK</li> <li>▪ BRE Global, ltd</li> </ul>
<b>Suécia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ School of Architecture and the Built Environment, Stockholm</li> <li>▪ University of Gavle</li> </ul>
<b>Suíça</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA)</li> </ul>

**Quadro A.2 - Principais iniciativas, organizações e países envolvidos, principais documentos produzidos no tema indicadores para construção sustentável**

Ano	Principais Iniciativas/Projetos	Organizações envolvidas, respectivos países e principais documentos produzidos
2000-2003	<i>CRISP Project<sup>1</sup> - Construction and City Related Sustainability Indicators</i>	<i>CRISP Network Board</i> : Coordenador <i>Luc Bourdeau</i> (CSTB); e Diretores, <i>Tarja Hakkinen</i> (VTT); <i>Pekka Huovila</i> (VTT) e <i>Sylviane Nibel</i> (CSTB).
2001-2005	<i>Performance Based Building, PeBBu</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ EC FP5 CRISP– PeBBu – <i>Performance Based Buildings, 2005</i></li> </ul>
2007-2010	<i>ENSLIC Building - Energy Saving through Promotion of Life Cycle Analysis in Building</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ENSLIC-WP1-CIRCE-D11-Rev1 <i>Quality Assurance Plan, 2007</i></li> <li>▪ ENSLIC-ARMINES-WPR21-Rev5-<i>State-of-the-art, 2009</i></li> <li>▪ <i>Malmqvist T, et al., Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines, Energy (2011), doi:10.1016 / j.energy.2010.03.026</i></li> </ul> <p>ARMINES (França), CIRCE (Espanha), KTH (Suécia), SINTEF (Noruega), CALCON (Alemanha), IFZ (Áustria), EMI (Hungria), ECOFYS BV (Holanda), SEC (Bulgária).</p>
permanente	<i>OECD Environmental Directorate</i>	<p><i>OECD Environmental Indicators: Development, Measurement and Use. OECD, Paris, 2003.</i></p> <p><i>OECD key environmental indicators, 2008. Lorents G. LORENTSEN</i></p>
	<i>UNEP (United Nations Environment Programme Industry and Environment – IETC – International Environmental Technology Centre)</i>	<i>GLOBAL ENVIRONMENT OUTLOOK: LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, GEO LAC 3, (2010)</i>

<sup>1</sup> Vinte e quatro organizações de quatorze países, sob a coordenação do CSTB e VTT coletaram e validaram 38 sistemas de indicadores relevantes utilizando uma estrutura (framework) compatível de sustentabilidade (CRISP Indicator Analysis. PeBBu GT2, final report, 2005).

**Quadro A.2 - Principais iniciativas, organizações e países envolvidos, principais documentos produzidos no tema indicadores para construção sustentável (cont.).**

Ano	Principais Iniciativas/Projetos	Organizações envolvidas, respectivos países e principais documentos produzidos
2009-2011	<p><i>LoRe-LCA - Low Resource consumption buildings and constructions by use of LCA in design and decision making</i></p> <p><i>Documentos disponíveis em: <a href="http://www.sintef.no/Projectweb/LoRe-LCA/Training/">http://www.sintef.no/Projectweb/LoRe-LCA/Training/</a></i></p>	<p><i>Zabalza, I. et al. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. Building and Environment, v.46, issue 5, May 2011, p.1133-1140.</i></p> <p><i>D2.1 State of the art report - Use of Life cycle assessment Methods and tools</i></p> <p><i>D2.3 Use and availability of Environmental product declarations (EPD)</i></p> <p><i>D2.4 Recommendations for European Standardization</i></p> <p><i>D2.5 Recommendations for policymaking</i></p> <p><i>D3.1 Building LCA good practice report</i></p> <p><i>D3.2 Guidelines for LCA</i></p> <p><i>D4.1 Report on experiences on national, European and international level of use of LCA in design</i></p> <p><i>D4.2 Report on scenarios for LCA in constructions</i></p> <p><i>D5.1 Indicators and weighting systems, including normalisation of environmental profiles</i></p> <p><i>D5.2 Methods and guidelines for sensitivity analysis, including results for analysis on case studies</i></p> <hr/> <p><i>SINTEF Byggforsk (Noruega), Ecole de Mines – ARMINES (França), Fundacion CIRCE Centro de Investigacion de Recursos y Consumos Energeticos (Espanha), IFZ Interdisziplinäres Forschungszentrum (Áustria), SEC Sofia Energy Centre Ltd.(Bulgária), EMI Epitesugyi Minosegellenorzo Innovacios Koehasznu Tarsagag (Hungria), KTH Kungliga Tekniska Högskolan (Suécia), CalCon Holding GmbH (Alemanha).</i></p>



**Quadro A.2 - Principais iniciativas, organizações e países envolvidos, principais documentos produzidos no tema indicadores para construção sustentável (cont.).**

Ano	Principais Iniciativas/Projetos		Organizações envolvidas, respectivos países e principais documentos produzidos	
2009-2011	<i>PERFECTION (Coordination action for Performance Indicators For Health, Comfort And Safety of The Indoor Environment)</i>		<i>BBRI Belgian Building Research Institute</i>	Bélgica
			<i>VTT Technical Research Centre of Finland</i>	Finlândia
			<i>APINTECH Applied Industrial technologies ltd.</i>	Grécia
			<i>CTU CVUT Faculty of civil engineering of the Czech Technical University in Prague</i>	República Tcheca
			<i>ARMINES Ecole de Mines</i>	França
			<i>KORNADT (empresa de pesquisa e consultoria, Prof. Oliver Kornadt)</i>	Alemanha
			<i>ICTAF Interdisciplinary centre for technology, analysis and forecast</i>	Israel
			<i>SITI Società Italiana Trasmissioni Industriali</i>	Itália
			<i>TUE The Eindhoven University of Technology</i>	Holanda
			<i>ASM <a href="#">Market Research and Analysis Centre Ltd.</a></i>	Polônia
			<i>BRE Building Research Establishment Ltd</i>	Reino Unido
2009-2012	<i>SBA - Sustainable Building Alliance</i>	<p><i>1. Piloting SBA common Metrics (2009 – 2010)</i></p> <p><i>2. Pilot test on Common Metrics (2011 – 2012)</i></p> <p><i>3. Linking SBA metrics to IFCs and BIM (2011-2012)</i></p> <p><i>4. Green Impact (2011 a 2012)</i></p>	<i>CSTB Centre Scientifique et Technique du Batiment</i> <sup>1 2 3</sup>	França
			<i>Association QUALITEL</i> <sup>1 2 4</sup>	
			<i>GECINA (observador)</i> <sup>1</sup>	
			<i>DGNB German sustainable building certificate</i> <sup>1 2</sup>	Alemanha
			<i>Fraunhofer IBP</i> <sup>2</sup>	
			<i>VTT Technical Research Centre of Finland</i> <sup>1 2 3</sup>	Finlândia
			<i>BRE Building Research Establishment Ltd</i> <sup>1</sup>	Reino Unido
			<i>USGBC United States Green Building Council</i> <sup>1 2</sup>	EUA
			<i>IVE Instituto Valenciano de la Edificación</i> <sup>1 2</sup>	Espanha
			<i>GBC Austrália</i> <sup>1</sup>	Austrália
			<i>TZUS Technical and Test Institute for Construction Prague (observador)</i> <sup>1 2</sup>	República Tcheca
<i>ITB</i> <sup>4</sup> , <i>Deloitte</i> <sup>4</sup> , <i>Euro Institute of Real State Management</i> <sup>4</sup>				

**Quadro A.2 - Principais iniciativas, organizações e países envolvidos, principais documentos produzidos no tema indicadores para construção sustentável (cont.)**

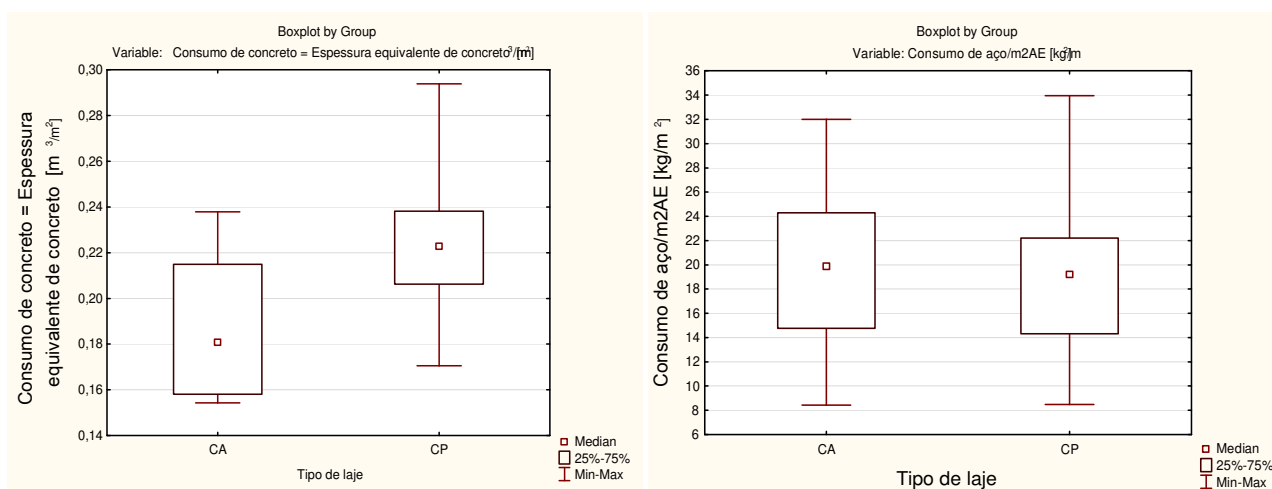
Ano	Principais Iniciativas/Projetos	Organizações envolvidas, respectivos países e principais documentos produzidos	
2010 - 2012	<p><i>SUPERBUILDINGS- Sustainability Performance Assessment and Benchmarking of Buildings</i></p> <p>Documentos parciais e Relatório final disponíveis em: &lt;<a href="http://cic.vtt.fi/superbuildings/">http://cic.vtt.fi/superbuildings/</a>&gt;. capturados em maio/2013.</p>	<i>VTT Technical research centre of Finland</i>	Finlândia
		<i>BRE Global ltd</i>	Reino Unido
		<i>CSTB Centre Scientifique et Technique du Batiment</i>	França
		<i>CSTC Belgian building research institute</i>	Bélgica
		<i>KIT-U Karlsruhe institute of Technology</i>	Alemanha
		<i>IAO, Institute for industrial engineering, Fraunhofer</i>	
		<i>CVUT Faculty of civil engineering of the Czech Technical University in Prague</i>	República Tcheca
		<i>TECNALIA-LAB</i>	Espanha
		<i>OGUT Austrian society for environment and technology</i>	Áustria
		<i>IYT Kiinteistötekniikka Oy</i>	Finlândia
		<i>VCF VINCI construction France</i>	França
		<i>WS Werner Sobek Stuttgart GmbH</i>	Alemanha
<i>W/E consultants</i>	Holanda		
2010- 2013	<p><i>OPEN HOUSE - Benchmarking and mainstreaming building sustainability in the EU based on transparency and openness (open source and availability) from model to implementation.</i></p> <p>Documentos disponíveis em: &lt;<a href="http://www.openhouse-fp7.eu/">http://www.openhouse-fp7.eu/</a>&gt;</p>	<a href="#"><u>Acciona Infraestructuras</u></a>	Espanha
		<a href="#"><u>Eusko Jaurlaritzza-Gobierno Vasco</u></a>	
		<a href="#"><u>VISESA Vivienda Y Suelo de Euskadi, S.A.</u></a>	
		<a href="#"><u>Fundación Agustín de Betancourt</u></a>	
		<a href="#"><u>Cae Services Geie – Conseil des architectes d' europe</u></a>	Bélgica
		<a href="#"><u>APINTECH Applied Industrial technologies ltd.</u></a>	Grécia
		<a href="#"><u>ARUP Ove Arup &amp; Partners International Limited</u></a>	Reino Unido
		<a href="#"><u>Bouygues Construction</u></a>	França
		<a href="#"><u>Electricite de France S.A.</u></a>	
		<a href="#"><u>Miasto Stołeczne Warszawa</u></a>	Polónia
		<a href="#"><u>Slovenski Gradbeni Grozd, Gospodarsko Interesno Zdruzenje</u></a>	Eslovenia
		<a href="#"><u>Gradbeni Institut ZRMK D. o. o.</u></a>	
		<a href="#"><u>D'appolonia Spa</u></a>	Itália
		<a href="#"><u>DNGB Deutsche Gesellschaft Fuer Nachhaltiges Bauen</u></a>	Alemanha
		<a href="#"><u>Fraunhofer-Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung E.V</u></a>	
		<a href="#"><u>Eidgenössische Technische Hochschule Zürich</u></a>	
		<a href="#"><u>Instytut Techniki Budowlanej (Building research institute)</u></a>	Polónia
<a href="#"><u>Mostostal Warszawa S.A</u></a>			
<a href="#"><u>SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB</u></a>	Suécia		



## APÊNDICE B - VALORES MÁXIMO E MÍNIMO, MEDIANA E A VARIABILIDADE DOS INDICADORES

### 1 RESULTADOS DOS INDICADORES TÉCNICO-FUNCIONAIS

As Figura B.1 e Figura B.2 mostram os valores máximo e mínimo, a mediana e a variabilidade dos indicadores técnico-funcionais, em uma análise entre dois grupos: sistemas estruturais em concreto armado (CA) e em concreto protendido (CP) .



**Figura B.1 - Mínimos e máximos, mediana e variabilidade para espessura equivalente [m³/m²<sub>AE</sub>] e consumo de aço [kg/m²<sub>AE</sub>] na análise comparativa entre pavimentos-tipo em CA e CP (tela original do software *Statistica 10, v.10.0.1011.0*)**

Os indicadores de consumo de aço e de concreto foram calculados tanto para pavimento-tipo, quanto para superestrutura e a análise estatística dos resultados está indicada na Figura B.3.

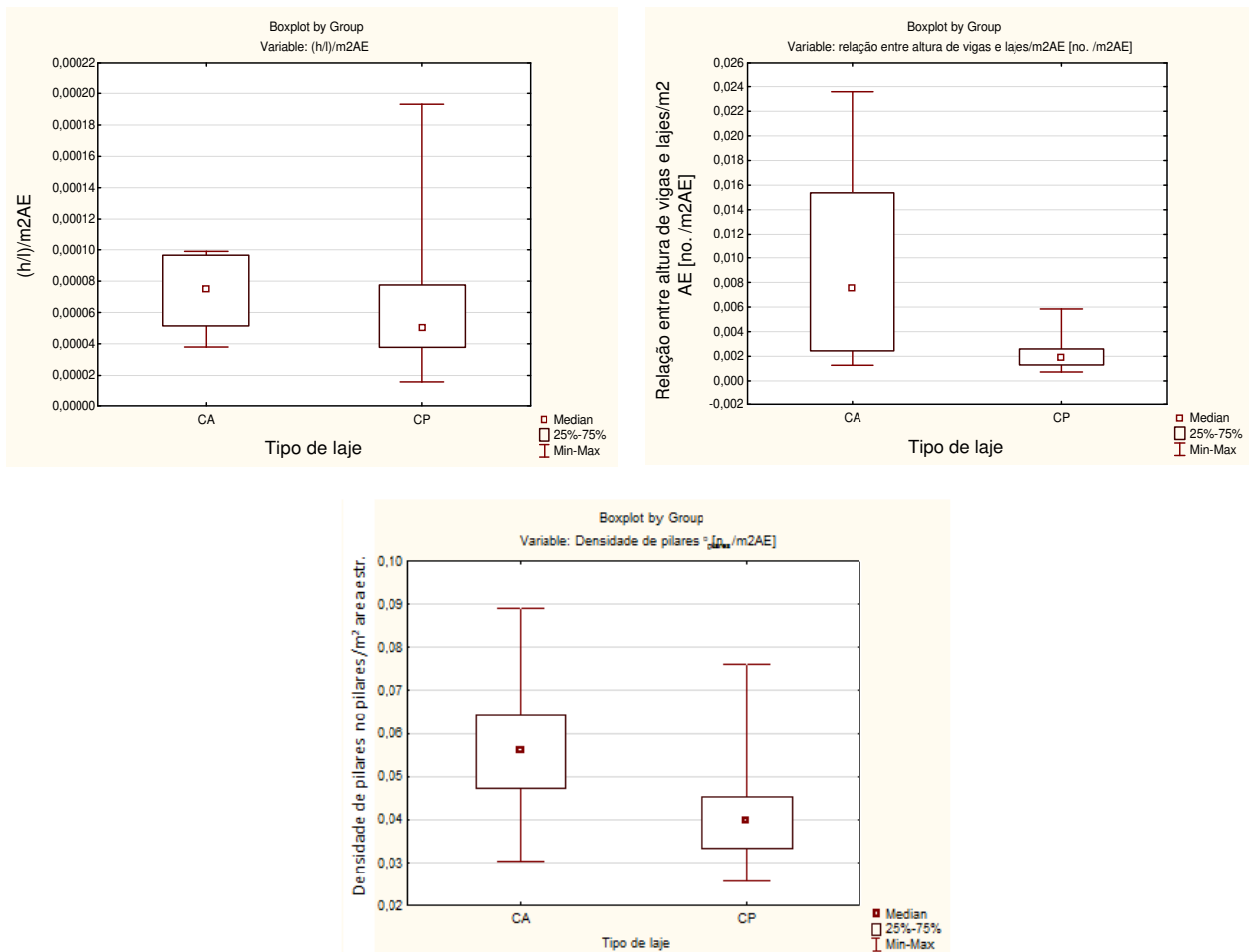


Figura B.2 - Mínimos e máximos, mediana e variabilidade para relação  $h/\ell$  relação, relação  $h*vl/hl$  e densidade de pilares na análise comparativa entre pavimentos-tipo em CA e CP (tela original do software *Statística 10, v.10.0.1011.0*)

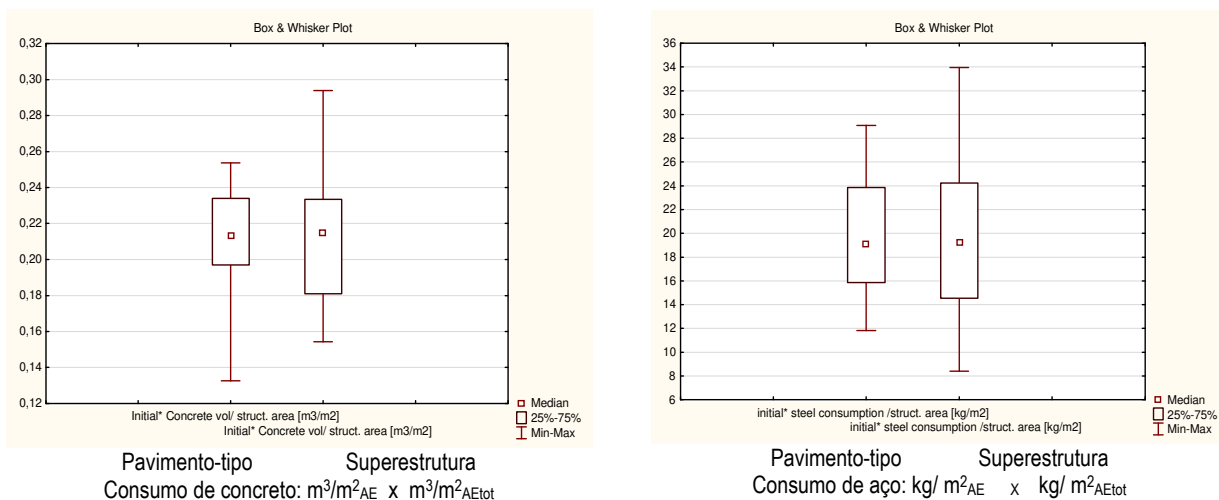
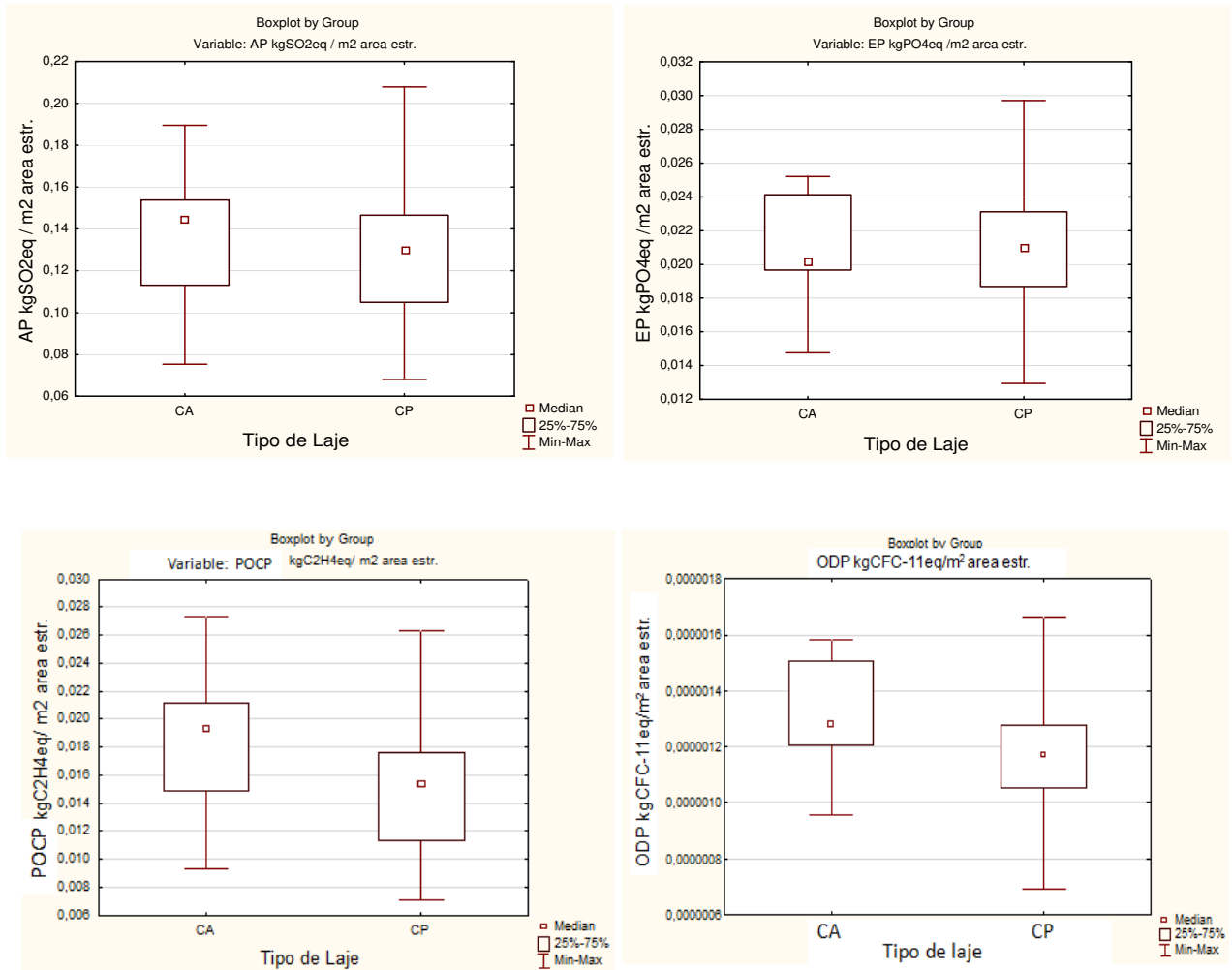


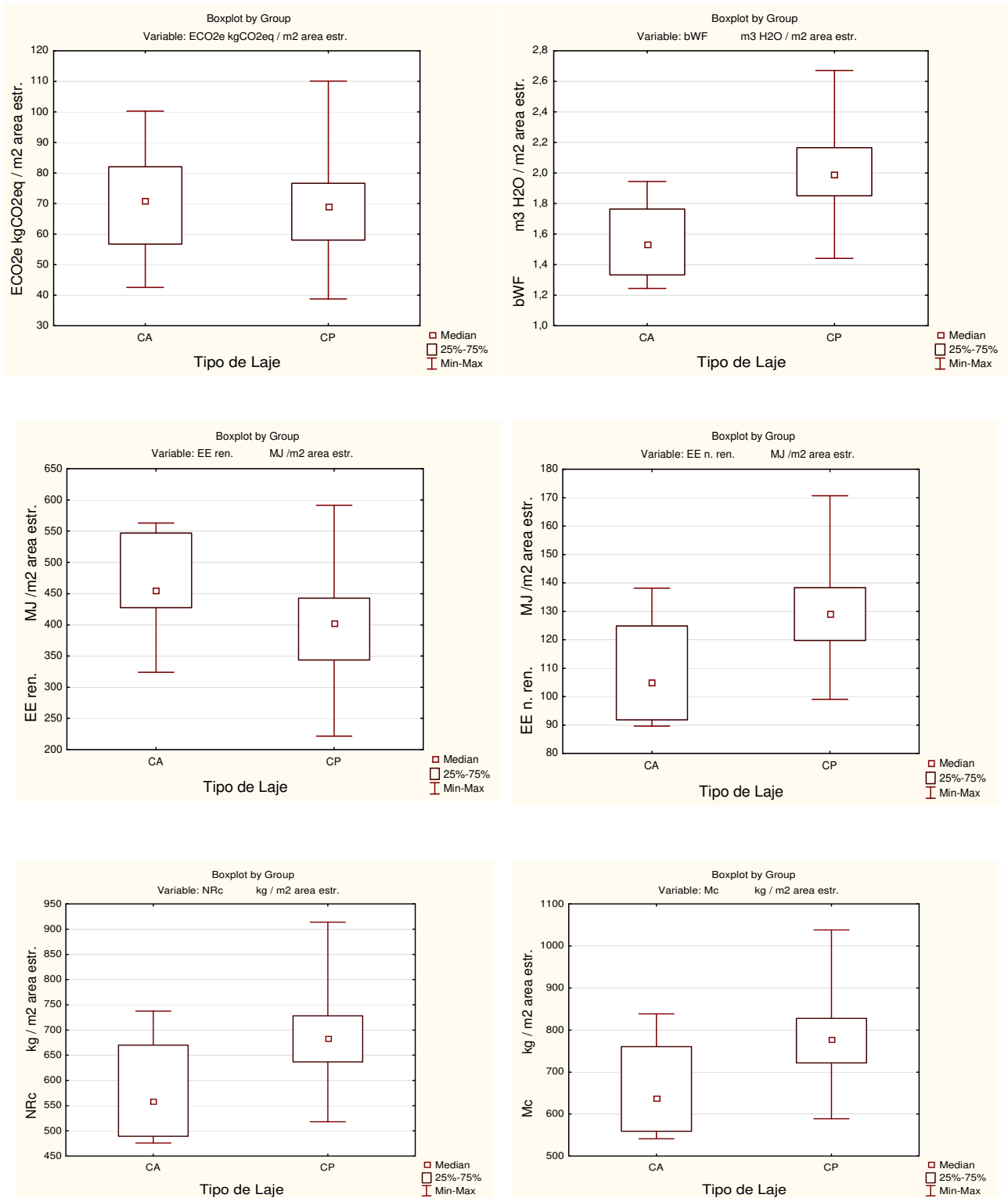
Figura B.3 - Mínimos e máximos, mediana e variabilidade dos indicadores - espessura equivalente de concreto (vol. Conc./ $m^2_{AE}$ ) e consumo de aço ( $kg/m^2_{AE}$ ) numa análise comparativa entre pavimento-tipo e superestrutura (tela original do software *Statística 10, v.10.0.1011.0*)

## 2 RESULTADOS DOS INDICADORES AMBIENTAIS

Os resultados da análise estatística referente aos valores dos indicadores ambientais calculados para os pavimentos-tipo dos estudos de caso são apresentados nas Figura B.4 e Figura B.5, que contém valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade (indicada pelos resultados de magnitude entre 25% e 75% da mediana) nos grupos concreto armado (CA) e concreto protendido (CP).

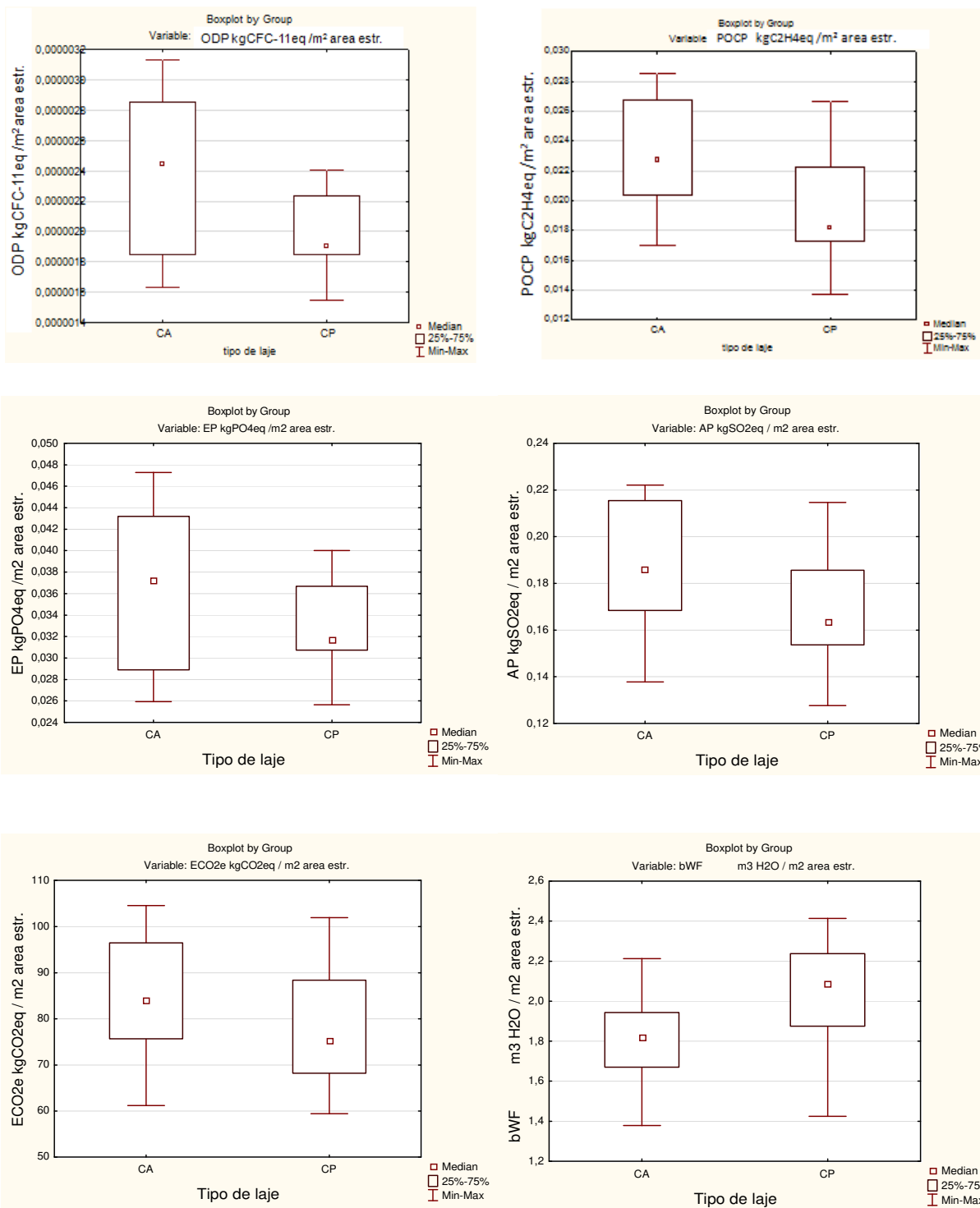


**Figura B.4 - Valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade dos indicadores AP, EP, POCP e ODP, numa análise comparativa entre pavimentos-tipo dos grupos CA e CP (tela original do software *Statistica 10, v.10.0.1011.0*)**

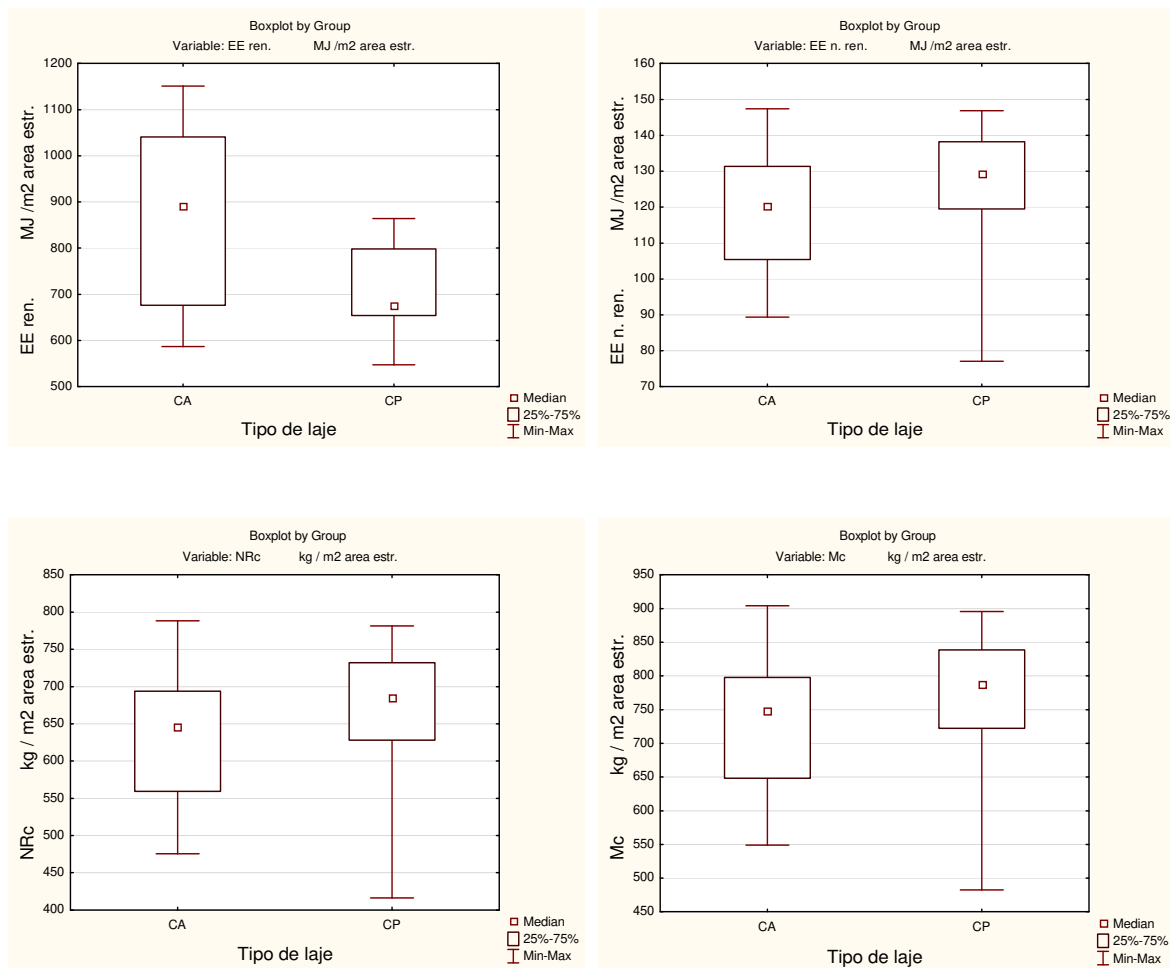


**Figura B.5 - Valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade dos indicadores  $ECO_{2e}$ , bWF,  $EE_{ren}$ ,  $EE_{n,ren}$ , NRC e Mc, em análise comparativa entre pavimentos-tipo dos grupos (CA) e (CP) (tela original do software *Statistica 10*, v.10.0.1011.0)**

Os resultados dos indicadores ambientais calculados para a superestrutura dos estudos de caso, são indicados nas Figura B.6 e Figura B.7.



**Figura B.6 - Valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade dos indicadores AP, ODP, EP, POCP, ECO<sub>2e</sub> e bWF numa análise comparativa entre superestruturas em CA e CP (tela original do software *Statistica 10*, v.10.0.1011.0)**



**Figura B.7 - Valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade dos indicadores  $EE_{ren}$ ,  $EE_{n,ren}$ , NRC e Mc, numa análise comparativa entre superestruturas em CA e CP (tela original do software *Statistica 10*, v.10.0.1011.0)**

As Figura B.8 e Figura B.9 mostram os valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade dos indicadores ambientais, numa análise comparativa entre resultados da superestrutura e do pavimento-tipo para os estudos de caso.



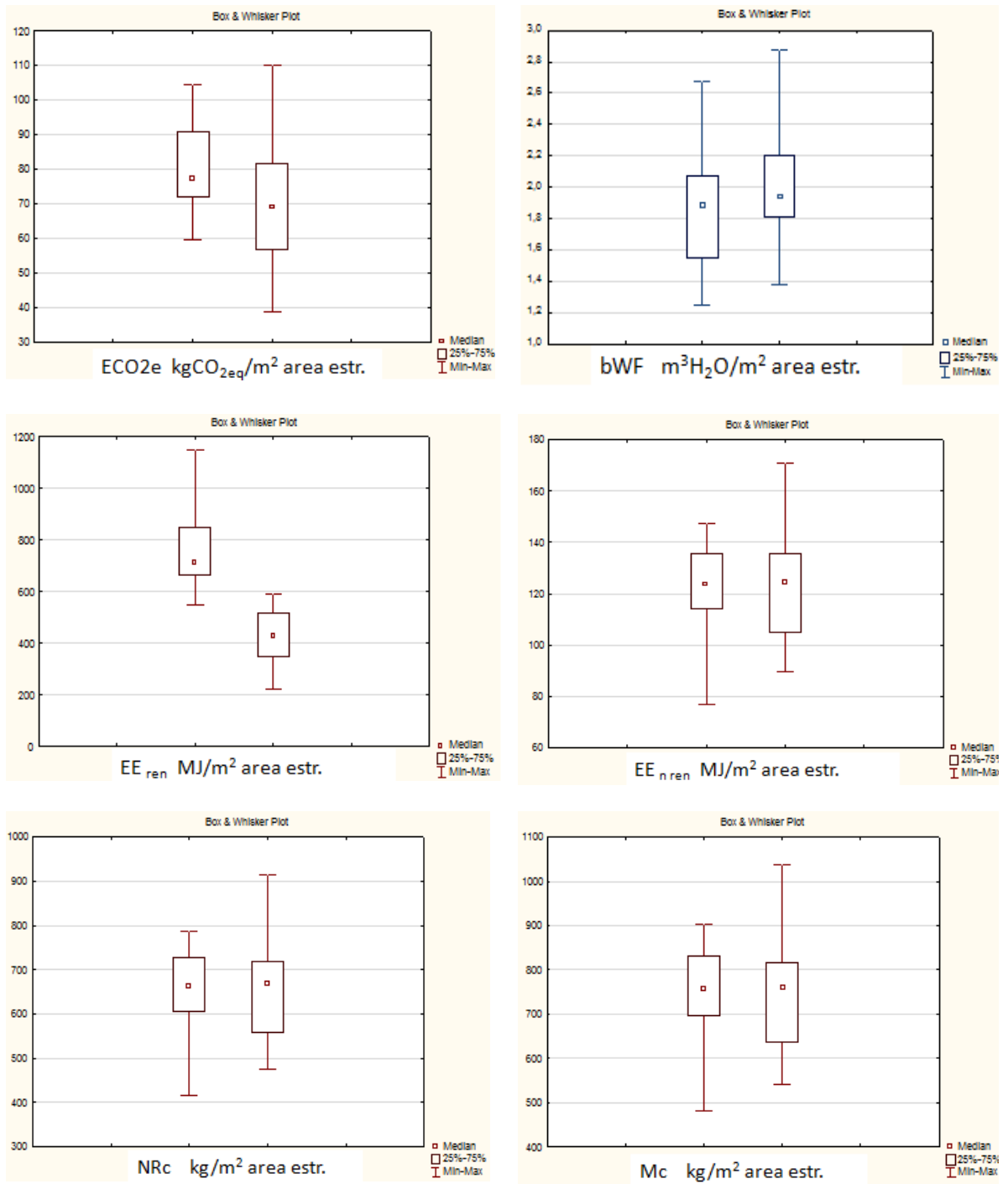


Figura B.8 - Valores mínimos e máximos, mediana e variabilidade dos indicadores ECO<sub>2e</sub>, bWF, EE<sub>ren</sub>, EE<sub>n,ren</sub>, NRc e Mc numa análise comparativa entre a superestrutura e o pavimento-tipo de cada estudo de caso (tela original do software *Statistica 10*, v.10.0.1011.0)

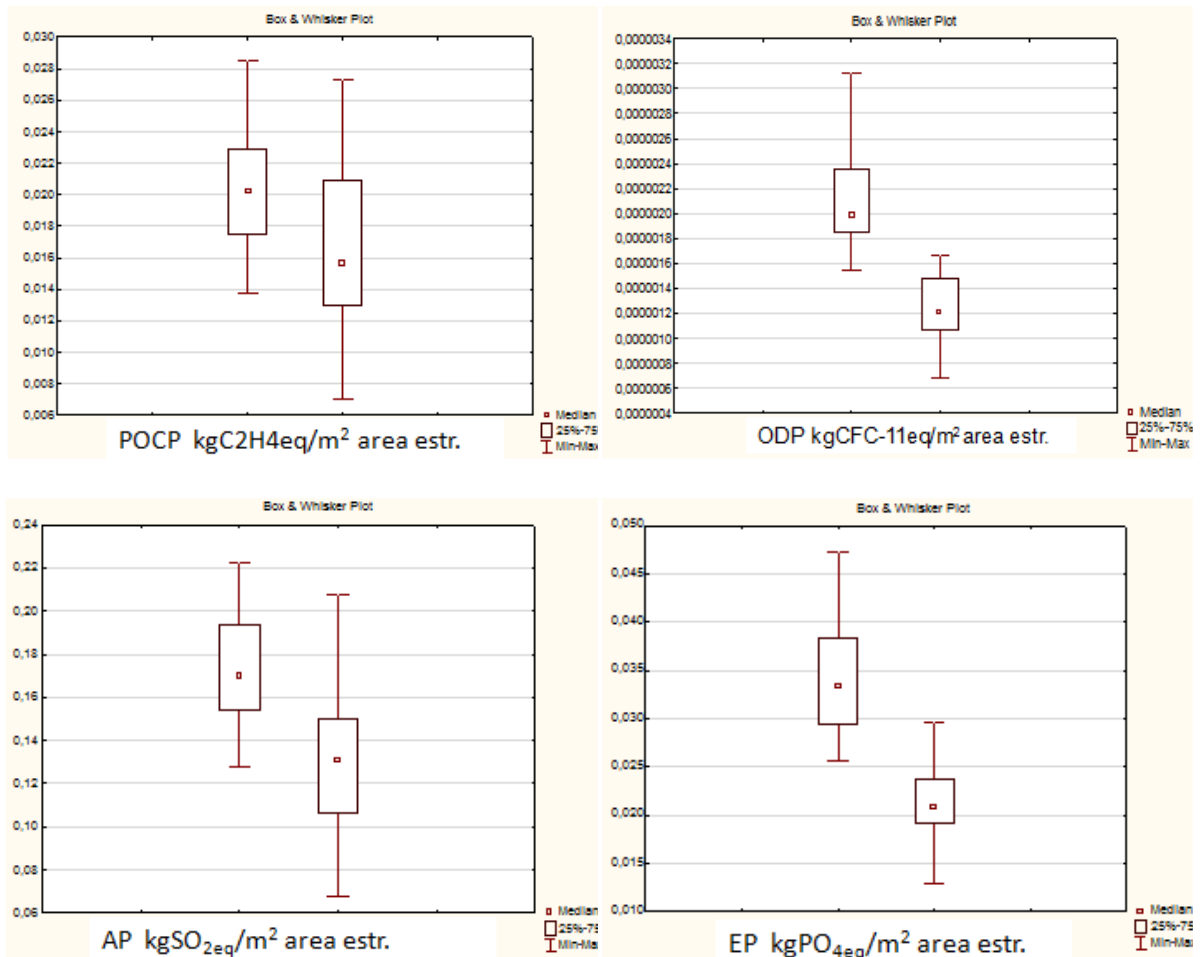
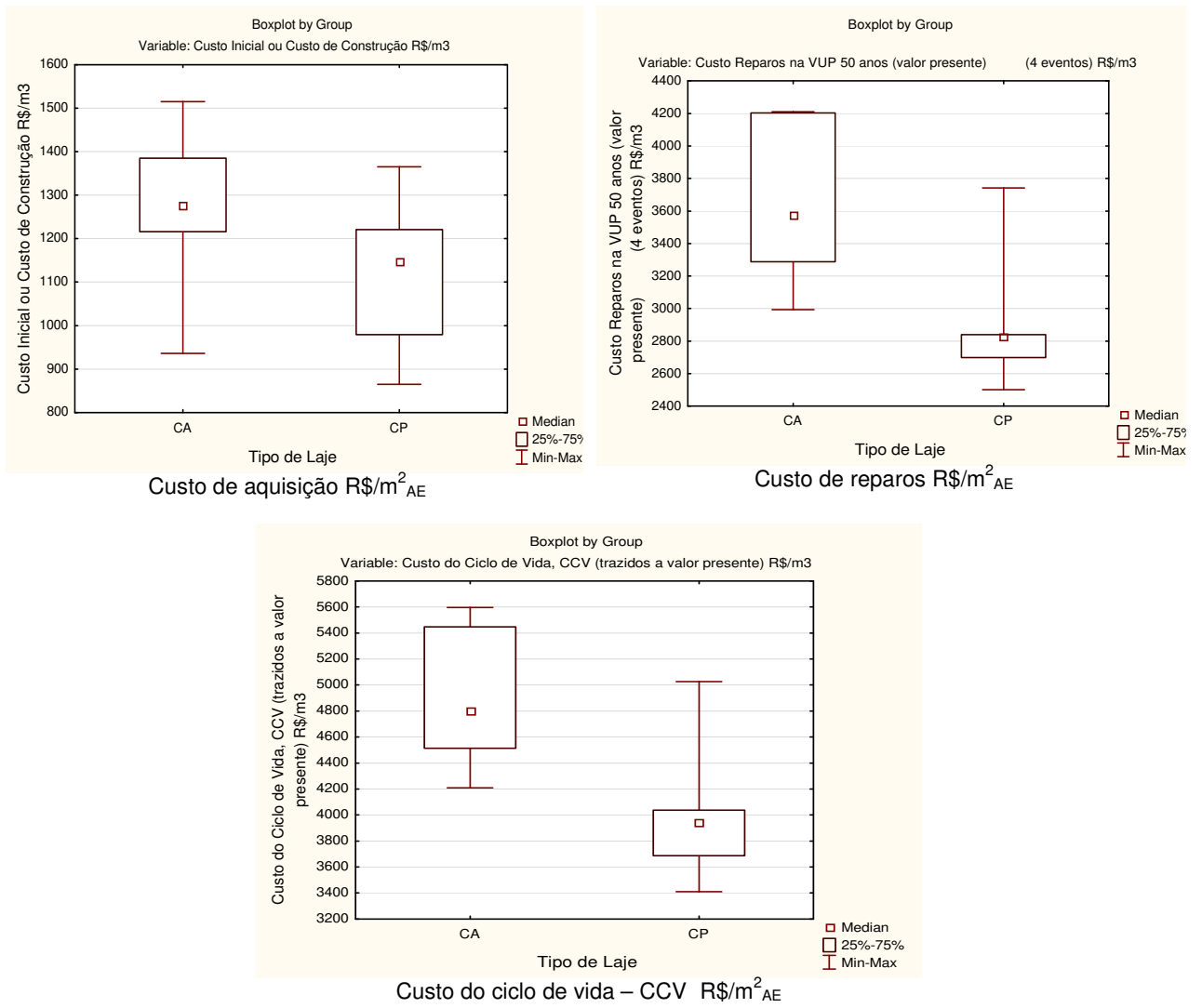


Figura B.9 - Valores mínimos e máximos, mediana e variabilidade dos indicadores POCP, ODP, AP e EP numa análise comparativa entre superestrutura e pavimento-tipo dos estudos de caso (tela original do software *Statística 10, v.10.0.1011.0*)

### 3 RESULTADOS DO INDICADOR ECONÔMICO

A Figura B.10 mostra os valores mínimos e máximos, mediana, e variabilidade dos componentes do CCV, numa análise comparativa entre resultados dos grupos CA e CP dos pavimentos-tipo dos estudos de caso. Nela observa-se a maior variabilidade dos custos de reparos e custo total do ciclo de vida (CCV) no grupo CA.



**Figura B.10 - Valores mínimos e máximos, mediana e variabilidade das variáveis componentes do CCV (custo de aquisição e custo de reparos) e do CCV, numa análise comparativa entre pavimentos-tipo em concreto armado (CA) e concreto protendido (CP) (tela original do software *Statistica 10*, v.10.0.1011.0)**