

Andrea Invidiata

**MÉTODO DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE
ESTRATÉGIAS DE PROJETO DE EDIFICAÇÕES MAIS
SUSTENTÁVEIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Civil.

Orientador: Eneid Ghisi, PhD.
Coorientadora: Monica Lavagna, PhD.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Invidiata, Andrea
MÉTODO DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE ESTRATÉGIAS DE
PROJETO DE EDIFICAÇÕES MAIS SUSTENTÁVEIS / Andrea
Invidiata ; orientador, EneDir Ghisi,
coorientadora, Monica Lavagna, 2017.
333 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Edificações sustentáveis.
3. Avaliação do Ciclo de Vida. 4. Eficiência
energética. 5. Método de tomada de decisão
multicritério.. I. Ghisi, EneDir. II. Lavagna,
Monica. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. IV. Título.

Andrea Invidiata

MÉTODO DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE
ESTRATÉGIAS DE PROJETO DE EDIFICAÇÕES MAIS
SUSTENTÁVEIS

Tese julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 17 de outubro de 2017

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Enedir Ghisi, *PhD*.
UFSC- Orientador

Banca Examinadora:

Prof^a Lucila Chebel Labaki, Dr.^a – UNICAMP (videoconferência)

Prof. Eduardo Grala da Cunha, Dr. – UFPel (videoconferência)

Prof^a Michele Fossati, Dr.^a - UFSC

Prof. Sebastião Roberto Soares, *PhD*. - UFSC

Prof. Roberto Lamberts, *PhD*. - UFSC

AGREDECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Eneidir Ghisi pela orientação, pela amizade e pelos ensinamentos de vida.

À Prof^a Monica Lavagna, pela co-orientação no ano de pesquisa desenvolvido no Politécnico de Milão.

Aos Professores Lucila Chebel Labaki, Eduardo Grala da Cunha, Michele Fossati, Sebastião Roberto Soares e Roberto Lamberts pelas importantes sugestões, que muito contribuíram para este trabalho.

Aos amigos do LabEEE e da “salinha do lado“ que me apoiaram e me ajudaram no desenvolvimento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que financiou esta pesquisa.

Aos meus amigos brasileiros e italianos que me suportaram nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Leandra e Alessandro, e meu irmão Marco, que mesmo longe, sempre me incentivaram e me apoiaram nestes anos de grande saudade.

À minha namorada Pamella, sem Você nada teria sentido.....

RESUMO

O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais e energia do mundo. As estratégias de projeto para melhorar a eficiência energética são uma solução para aumentar o desempenho de um edifício. No entanto, na maioria dos casos, tais estratégias são avaliadas somente na fase operacional de uma edificação. Para escolher de maneira correta as estratégias de projeto de edifícios, elas devem ser analisadas com uma abordagem multidisciplinar baseada no desenvolvimento sustentável. O conceito de desenvolvimento sustentável baseia-se em três pilares: ambiental, econômico e social. Através do equilíbrio destes três fatores principais, um produto pode ser definido sustentável. Outro aspecto de grande relevância são os efeitos das mudanças climáticas que afetam diretamente o comportamento térmico e energético dos edifícios. Por este motivo, esses efeitos devem ser considerados no desempenho das edificações durante suas vidas úteis. Neste contexto, o objetivo principal desta tese é propor um método que permita escolher estratégias de projeto mais adequadas para obter edificações mais sustentáveis. O método proposto baseia-se no conceito de desenvolvimento sustentável em edifícios. Através da combinação de simulações termoenergéticas, Avaliação do Ciclo de Vida, Análise de Custo do Ciclo de Vida, método de conforto adaptativo e método de tomada de decisão multicritério será possível escolher as estratégias de projeto mais sustentáveis a serem aplicadas nas edificações. Os quatro parâmetros utilizados para avaliar as estratégias de projeto em edifícios são: as horas de conforto obtidas através do método do conforto térmico adaptativo, a demanda de energia no ciclo de vida, as emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida e o custo financeiro das estratégias de projeto no ciclo de vida. Além disso, para investigar os efeitos das mudanças climáticas nas edificações, utilizou-se o cenário A2 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Para quantificar esses impactos, o programa computacional *Climate Change World Weather File Generator* foi utilizado para gerar os arquivos climáticos dos anos de 2020, 2050 e 2080. O método proposto foi aplicado em dois países: Brasil e Itália. Uma edificação residencial unifamiliar localizada em três cidades brasileiras foi avaliada considerando vida útil de 63 anos. Neste estudo de caso, foram analisadas doze estratégias de projeto. Foram avaliados quatro elementos de sombreamento, dois tipos de isolantes térmicos, dois revestimentos de paredes externas, dois forros e dois tipos de janelas. Na Itália, um edifício residencial multifamiliar, localizado em Milão, foi avaliado considerando vida útil de 100 anos. Neste

contexto, foram avaliadas três estruturas diferentes da edificação: X-Lam, estrutura em concreto armado e em aço. As três estruturas foram analisadas com materiais de isolamento e da envoltória diferentes. Assim, foram avaliados seis estudos de caso: estrutura em X-Lam e lâ de rocha (caso real), X-Lam e fibra de madeira, estrutura em concreto armado com blocos de concreto celular, concreto armado com tijolos cerâmicos *rettificati* (com funções de isolamento térmico), estrutura em aço e paredes leves com lâ de rocha, estrutura em aço e paredes leves com fibra de madeira. O programa computacional *EnergyPlus* foi utilizado para estimar o consumo anual de energia para aquecimento e resfriamento e para avaliar as horas de conforto na edificação com as diferentes soluções de projeto. A avaliação do ciclo de vida energético e das emissões das estratégias de projeto foi realizada por meio do uso de base de dados nacionais e internacionais. Diferentes cenários de manutenção das soluções de projeto também foram aplicados para verificar a influência destes na avaliação do ciclo de vida. A fase de reuso no ciclo de vida das estratégias de projeto foi analisada exclusivamente a título informativo para verificar a importância dela na avaliação da ACV. Por fim, os preços das diferentes estratégias de projeto e das atividades para sua aplicação foram obtidos através do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e da *Camera di Commercio di Milano*, respectivamente no estudo de caso no Brasil e na Itália. A inflação média dos índices de preços ao consumidor dos últimos dez anos nos dois países foi utilizada para avaliar os custos futuros das estratégias de projeto. Um questionário foi aplicado a 30 profissionais no setor da construção civil na região de Milão para identificar as prioridades dos quatro parâmetros e utilizar o método de tomada de decisão multicritério na escolha final das estratégias de projeto. Os resultados obtidos mostraram que através da aplicação do método proposto é possível identificar as estratégias de projeto mais adequadas para se obter edificações mais sustentáveis. Os efeitos das mudanças climáticas nas edificações resultaram ser evidentes tanto no estudo de caso brasileiro quanto no italiano. O aumento da temperatura média anual e da radiação global reduzirão o consumo de energia para aquecimento, mas aumentarão o consumo para o resfriamento interno das edificações. No estudo de caso brasileiro os resultados mostraram que estratégias de projeto que obtiveram bom desempenho energético na fase operacional, nem sempre proporcionaram comportamento adequado nos quatro parâmetros avaliados. As soluções de projeto aplicadas na edificação em três

idades no Brasil resultaram em desempenhos diferentes. Os três cenários de manutenção influenciaram de forma significativa os resultados finais dos parâmetros que avaliam o ciclo de vida das estratégias de projeto, enquanto os diferentes cenários de transporte apresentaram influência menor. Nos dois estudos de caso avaliados, no Brasil e na Itália, as bases de dados utilizadas tanto na avaliação energética quanto na avaliação das emissões de CO₂ podem modificar de forma significativa os resultados finais para a seleção das estratégias de projeto. A escolha adequada da base de dados é uma das maiores críticas na avaliação da ACV. A aplicação do método de tomada de decisão multicritério resultou ser um instrumento útil para seleção da melhor solução de projeto. No estudo de caso italiano os resultados mostraram que a solução de projeto com o maior nível de sustentabilidade foi a estrutura de concreto armado com tijolos cerâmicos *rettificati* (com funções de isolamento térmico), seguida pela estrutura em concreto armado com blocos de concreto celular e a estrutura em X-Lam e fibra de madeira, em comparação com o caso atual da edificação. Esta tese demonstrou a necessidade de aplicar o método proposto para garantir a escolha correta de estratégias de projeto que permitam obter edificações mais sustentáveis. O método apresentado pode ser aplicado em outras tipologias de edificações e em contextos diferentes. Através de uma abordagem mais holística na escolha das estratégias de projeto será possível obter edificações mais eficientes energeticamente, com melhor conforto térmico, reduzindo, ao mesmo tempo, as emissões e os custos financeiros.

Palavras-chave: edificações sustentáveis, Avaliação do Ciclo de Vida, Análise de Custo do Ciclo de Vida, eficiência energética, conforto térmico, mudanças climáticas, método de tomada de decisão multicritério.

ABSTRACT

The building sector is one of the largest consumers of natural resources and energy in the world. Design strategies to improve the energy efficiency are a solution to increase the performance of a building. However, in most cases, such strategies are assessed only in the operational phase of a building. In order to evaluate the correct way to choose design strategies in buildings, they should be analysed taking into account a multidisciplinary approach based on sustainable development. The concept of sustainable development is based on three pillars: sustainable economic growth, social development and environmental protection. By balancing these three main factors, a product can be defined as sustainable. Likewise, the effects of climate change directly affect the energy and thermal behaviour of buildings. For this reason these effects should be considered in the thermal and energy performance of buildings during their life cycle. Thus, the main objective of this thesis is to propose a method that allows to choose design strategies more appropriate to lead to more sustainable buildings. The method is based on the concept of sustainable development in buildings. Through the combination of building energy simulation, Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost, indoor comfort conditions and the multicriteria decision-making method it is possible to choose the most sustainable design strategies to be applied in buildings. The four parameters used to evaluate the design strategies in buildings are: the indoor thermal comfort hours obtained through the adaptive thermal comfort method, the energy demand over the life cycle, the carbon dioxide emissions over the life cycle and the monetary cost of the strategies over the life cycle. Furthermore, to investigate the effect of the climate change in buildings, the scenario A2 of the Intergovernmental Panel on Climate Change was used. To quantify these impacts, the Climate Change World Weather File Generator was used to produce weather data for future typical meteorological years, i.e., 2020, 2050 and 2080. The method was applied in two countries: Brazil and Italy. A single-family house located in three Brazilian cities was evaluated considering a 63-year lifespan. In this case study, twelve design strategies were analysed: four shading devices, two thermal insulations, two coating exterior walls, two roofs and two typologies of windows. In Italy, a multifamily residential building, located in Milan, was evaluated based on a 100-year lifespan. In this context, three different structure of the building were evaluated: X-Lam, reinforced concrete frame and steel frame. The three structures were analysed with a different insulation or

envelope materials. Eventually, six case studies of the building were evaluated: X-Lam and rock wool (actual case), X-Lam and wood fibre, reinforced concrete frame with cellular concrete blocks, reinforced concrete frame with heat-insulating clay block brick, steel frame and drywall with rock wool and steel frame and drywall with wood fibre. The EnergyPlus computer programme was used to estimate only the annual energy consumption for air-conditioning and the indoor comfort hours in the different cases of buildings. The energy and emissions life cycle of the design strategies were obtained through the use of national and international databases. Different maintenance scenarios of the design solutions were also applied to verify their influence on the life cycle assessment. The reuse phase in the life cycle was analysed exclusively for informative purposes to verify the importance of it in the evaluation of the LCA. Finally, the prices of the different design strategies as well as the activities for its application were obtained through the *Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil* (SINAPI) and the *Camera di Commercio di Milano*, respectively in the case study in Brazil and in Italy. The average inflation rate in the last ten years in the two countries was used to estimate the future costs. To analyse the four parameters used in this study, 30 traders of the construction sector from the region of Milan were selected to participate in the survey in order to set the criteria weights and determine their priority. The results showed that through the application of the proposed method it is possible to identify the most appropriate design strategies for more sustainable buildings. The effects of climate change on buildings are evident in the Brazilian and Italian case studies. The increase in the average temperature and global solar radiation, will reduce the consumption for heating, but on the other hand will increase the consumption for the internal cooling of the buildings. In the Brazilian case study the results show that the design strategies that obtained a good energy performance in the operational phase, do not always provide an adequate behaviour in the four sustainability parameters evaluated. Among the three cities analyzed, the design solutions applied in the building presented a different performance. The three maintenance scenarios significantly influence the final results of the parameters evaluated in the life cycle of the design strategies, while the different transport scenarios presented a smaller influence. In the two case studies evaluated in Brazil and Italy, the different data-bases used in the primary energy demand and carbon emissions parameters can significantly modify the final results for the selection of the project

strategies. The adequate selection of the database is one of the main problems in the evaluation of LCA. Also, the application of the multicriteria decision-making method proved to be a useful instrument for selecting the best final design solution. In the Italian case study the results showed that the design solution with the highest level of sustainability was the reinforced concrete frame with rectified bricks, followed by the reinforced concrete frame with cellular concrete blocks and the frame in X-Lam and wood fibre, compared to the actual case of the building. This thesis has demonstrated the need to apply the proposed method to ensure the correct choice of design strategies for more sustainable buildings. The method used can be applied in different types of buildings and locations. Through a more holistic approach to choose the design strategies in buildings we will improve the energy efficiency and the indoor comfort conditions by reducing emissions and financial cost.

Keywords: sustainable development buildings, Life Cycle Assessment, Life Cycle Cost, energy efficiency, comfort conditions, climate change, multicriteria decision-making method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fases da ACV.....	45
Figura 2- Energia embutida (GJ/m^2) em edifícios residenciais em pesquisas internacionais.....	65
Figura 3- Energia embutida (%) em edifícios residenciais em pesquisas internacionais.....	66
Figura 4- Esquema do método de pesquisa.....	89
Figura 5- Fluxograma do método.....	91
Figura 6- Fluxograma da avaliação do parâmetro energético nas estratégias de projeto.....	99
Figura 7- Fluxograma da avaliação do parâmetro das emissões de CO_2 nas estratégias de projeto.....	111
Figura 8- Fluxograma da avaliação do parâmetro de custo nas estratégias de projeto.....	120
Figura 9- Relação entre os quatro parâmetros da sustentabilidade das diferentes estratégias de projeto aplicadas nas edificações.....	126
Figura 10- Forma matricial utilizada no método AHP.....	127
Figura 11- Cidades brasileiras onde a edificação foi avaliada.....	132
Figura 12- Planta baixa do estudo de caso brasileiro.....	133
Figura 13- Planta da edificação residencial com as zonas térmicas.....	135
Figura 14- Modelo geométrico da edificação residencial.....	135
Figura 15- Distância do transporte da estratégia do fabricante até o local da obra.....	145
Figura 16- Inflação média dos índices de preços ao consumido dos últimos 10 anos no Brasil.....	147
Figura 17- Mapa da Itália com a localização da cidade de Milão.....	150
Figura 18- Condomínio utilizado como estudo de caso na cidade de Milão.....	150
Figura 19- Edificação utilizada como estudo de caso na cidade de Milão.....	151
Figura 20- Planta baixa do pavimento tipo do estudo de caso em Milão.....	152
Figura 21- Modelo geométrico da edificação residencial multifamiliar.....	154
Figura 22- Planta baixa do pavimento tipo com as zonas térmicas.....	155
Figura 23- Estrutura portante nos projetos de edificações multifamiliares de interesse social.....	158
Figura 24- Distância do transporte da estratégia do fabricante até o local da obra.....	162

Figura 25- Inflação média dos índices de preços ao consumidor dos últimos 10 anos na Itália.....	168
Figura 26- Temperatura média mensal nas três cidades brasileiras nos diferentes períodos.	170
Figura 27- Umidade média mensal nas três cidades brasileiras nos diferentes períodos.....	172
Figura 28- Radiação global mensal nas três cidades brasileiras nos diferentes períodos.....	173
Figura 29- Horas de conforto do usuário da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.....	174
Figura 30- Média anual das horas de conforto térmico na edificação com as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.	177
Figura 31- Balanço das horas de conforto nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.	177
Figura 32- Energia embutida nas doze estratégias de projeto avaliadas.	179
Figura 33- Consumo anual de energia para o condicionamento da edificação com e sem as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis, atual e futuro.....	181
Figura 34- Consumo anual médio de energia para condicionamento da edificação com e sem estratégias em Florianópolis.....	182
Figura 35- Energia economizada nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias em Florianópolis.....	183
Figura 36- Energia de manutenção das estratégias de projeto nos diferentes cenários nas três cidades brasileiras.....	185
Figura 37- Energia de desconstrução das estratégias de projeto.	187
Figura 38- Energia de reuso das estratégias de projeto.	188
Figura 39- Ciclo de vida energético das estratégias de projeto	189
Figura 40- Ciclo de vida energético das estratégias de projeto com a energia de reuso.	190
Figura 41- Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Florianópolis sem a fase de reuso.....	193
Figura 42- Emissões de CO ₂ na fase inicial das doze estratégias de projeto avaliadas nas três cidades brasileiras.	195
Figura 43- Emissões evitadas com as estratégias de projeto em Florianópolis.....	196
Figura 44- Emissões de CO ₂ na fase de manutenção das estratégias de projeto nos diferentes cenários	198
Figura 45- Emissões de CO ₂ na fase de desconstrução das estratégias de projeto.....	199

Figura 46- Ciclo de vida das emissões de CO ₂ das estratégias de projeto.....	200
Figura 47- Balanço das emissões de CO ₂ da edificação com as estratégias de projeto em Florianópolis.....	201
Figura 48- Custo inicial das estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.....	203
Figura 49- Economia financeira na fase operacional na cidade de Florianópolis.....	204
Figura 50- Custo de manutenção das estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.....	205
Figura 51- Custo de desconstrução das estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.....	206
Figura 52- Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos três cenários na cidade de Florianópolis.....	208
Figura 53- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 1 em Florianópolis.....	210
Figura 54- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 2 em Florianópolis.....	211
Figura 55- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 3 em Florianópolis.....	212
Figura 56- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Florianópolis no cenário 1.....	216
Figura 57- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Florianópolis no cenário 2.....	217
Figura 58- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Florianópolis no cenário 3.....	218
Figura 59- Balanço de conforto da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão.....	219
Figura 60- Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão.....	220
Figura 61- Balanço das emissões CO ₂ e da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão.....	221
Figura 62- Balanço econômico financeiro da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão.....	222
Figura 63- Resultados das cinco soluções de projeto nos quatro parâmetros aplicados no estudo de caso em Milão.....	223
Figura 64- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Milão.....	224
Figura 65- Média anual das horas de conforto térmico na edificação com as estratégias de projeto na cidade de Curitiba.....	285

Figura 66- Média anual das horas de conforto térmico na edificação com as estratégias de projeto na cidade de Belém.....	285
Figura 67- Balanço das horas de conforto nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Curitiba	286
Figura 68- Balanço das horas de conforto nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Belém.	286
Figura 69- Consumo anual de energia para o condicionamento da edificação com e sem as estratégias de projeto na cidade de Curitiba, atual e futuro.....	287
Figura 70- Consumo anual de energia para o condicionamento da edificação com e sem as estratégias de projeto na cidade de Belém, atual e futuro.....	287
Figura 71- Consumo anual médio de energia para condicionamento da edificação com e sem estratégias em Curitiba.....	287
Figura 72- Consumo anual médio de energia para condicionamento da edificação com e sem estratégias em Belém.	288
Figura 73- Energia economizada nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias em Curitiba.	288
Figura 74- Energia economizada nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias em Belém.	288
Figura 75- Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Florianópolis com a fase de reuso.	289
Figura 76- Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Curitiba com e sem o potencial de reciclagem.	289
Figura 77- Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Belém com e sem o potencial de reciclagem.	290
Figura 78- Emissões evitadas da edificação com as estratégias de projeto em Curitiba.....	259
Figura 79- Emissões evitadas da edificação com as estratégias de projeto em Belém.....	291
Figura 80- Balanço das emissões de CO ₂ da edificação com as estratégias de projeto em Curitiba	291
Figura 81- Balanço das emissões de CO ₂ da edificação com as estratégias de projeto em Belém.....	292
Figura 82- Custo inicial das estratégias de projeto na cidade de Curitiba.	292
Figura 83- Custo inicial das estratégias de projeto na cidade de Belém.	293

Figura 84 Economia financeira na fase operacional da edificação em Curitiba	293
Figura 85- Economia financeira na fase operacional da edificação em Belém.....	293
Figura 86- Custo de manutenção das estratégias de projeto na cidade de Curitiba	294
Figura 87- Custo de manutenção das estratégias de projeto na cidade de Belém.....	294
Figura 88- Custo de desconstrução das estratégias de projeto na cidade de Curitiba.....	294
Figura 89- Custo de desconstrução das estratégias de projeto na cidade de Belém	295
Figura 90- Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos diferentes cenários na cidade de Curitiba	295
Figura 91- Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos diferentes cenários na cidade de Belém.....	296
Figura 92- Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos três cenários na cidade de Curitiba	297
Figura 93- Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos três cenários na cidade de Belém.....	297
Figura 94- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 1 em Curitiba.....	298
Figura 95- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 2 em Curitiba.....	299
Figura 96- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 3 em Curitiba.....	299
Figura 97- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 1 em Belém	300
Figura 98- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 2 em Belém	300
Figura 99- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 3 em Belém	301
Figura 100- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Curitiba no cenário 1	302
Figura 101- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Curitiba no cenário 2.....	302
Figura 102- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Curitiba no cenário 3.....	302
Figura 103- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Belém no cenário 1.	303

Figura 104- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Belém no cenário 2.	303
Figura 105- Importância relativas Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Belém no cenário 3.	303
Figura 106- Temperatura média mensal na cidade de Milão nos diferentes períodos.	307
Figura 107- Umidade média mensal na cidade de Milão nos diferentes períodos.	308
Figura 108- Radiação global mensal na cidade de Milão nos diferentes períodos.	308
Figura 109- Energia embutida nos quatro estudos de caso com estrutura em X-Lam.	309
Figura 110- Energia embutida nos estudos de caso com estrutura em concreto armado.	310
Figura 111- Energia embutida nos quatro estudos de caso com estrutura em Aço.	311
Figura 112- Horas de conforto nos estudos de caso avaliados na cidade de Milão.	313
Figura 113- Médias anuais de conforto do usuário na edificação nos seis estudos de caso em Milão.	314
Figura 114- Energia embutida nos estudos de casos da edificação em Milão.	315
Figura 115- Energia operacional atual e no futuro dos estudos de casos.	316
Figura 116- Energia operacional média atual e no futuro dos estudos de casos.	317
Figura 117- Energia operacional economizada nos 100 anos de vida da edificação nas soluções de projeto.	317
Figura 118- Energia de manutenção nos estudos de casos da edificação em Milão.	318
Figura 119- Energia de desconstrução nos seis casos da edificação em Milão.	319
Figura 120- Potencial de reciclagem nos seis casos da edificação em Milão.	320
Figura 121- Ciclo de vida energético das seis estratégias de projeto.	321
Figura 122- Emissões de CO ₂ e embutida das estratégias de projeto aplicadas na edificação.	322
Figura 123- Emissões de CO ₂ e na fase operacional das estratégias de projeto.	323

Figura 124- Emissões de CO ₂ e economizadas das estratégias de projeto.....	323
Figura 125- Emissões de CO ₂ e na fase de manutenção das estratégias de projeto aplicadas na edificação.....	324
Figura 126- Emissões de CO ₂ e na fase de desconstrução das estratégias de projeto.....	325
Figura 127- Emissões de CO ₂ e na fase de desconstrução com o potencial de reciclagem das estratégias de projeto.....	326
Figura 128- Emissões de CO ₂ e no ciclo de vida das estratégias de projeto.....	326
Figura 129- Custo inicial das estratégias de projeto na edificação em Milão.....	327
Figura 130- Economia financeira na fase operacional das estratégias de projeto aplicadas na edificação.....	328
Figura 131- Custo de manutenção das estratégias de projeto na edificação em Milão.....	329
Figura 132- Custo de desconstrução das estratégias de projeto na edificação em Milão.....	330
Figura 133- Custo no ciclo de vida das estratégias de projeto na edificação em Milão.....	330
Figura 134- Potencial de acidificação nas seis soluções de projeto no estudo de caso em Milão.....	331
Figura 135- Desempenho das soluções de projeto na edificação em Milão nas três categorias de impacto ambientais.....	332

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Categorias de impacto avaliadas na literatura sobre ACV nas edificações.	49
Tabela 2- Vida útil de uma edificação no Brasil segundo a norma NBR 15.575-1.	94
Tabela 3- Vida útil dos componentes construtivos de uma edificação da NBR 15.575-1.	95
Tabela 4- Vida útil dos materiais e equipamentos de uma edificação.	96
Tabela 5- Índice de Consistência Randômico em base aos números de parâmetros	128
Tabela 6- Cidades brasileiras onde é avaliado o estudo de caso	131
Tabela 7- Propriedades térmica da cobertura e das paredes do edifício residencial.	133
Tabela 8- Características das aberturas da edificação residencial.	134
Tabela 9- Cargas internas e padrão de uso das edificações residencial no estudo de caso brasileiro.	136
Tabela 10- Descrição dos dados de entrada dos parâmetros da ventilação natural.....	137
Tabela 11- Estratégias de projeto a ser avaliadas na edificação residencial.	141
Tabela 12- Características da envoltória da edificação em as estratégias de projeto.	142
Tabela 13- Energia embutida ICE.	143
Tabela 14- Base de dados emissões iniciais de CO ₂ no Brasil.	146
Tabela 15- Condições climáticas de Milão.....	149
Tabela 16- Propriedades térmica do envelope do estudo de caso em Milão.....	153
Tabela 17- Cargas internas e padrão de uso da edificação residencial na Itália.	156
Tabela 18- Projetos de edificações de interesse social multifamiliar na Itália.	157
Tabela 19- Estratégias de projeto no estudo de caso na Itália.	159
Tabela 20- Base de dados na energia embutida para o estudo de caso na Itália.	161
Tabela 21- Vida útil dos materiais de uma edificação na literatura internacional.....	163
Tabela 22- Base de dados na fase de reuso para o estudo de caso na Itália.....	164

Tabela 23- Base de dados emissões iniciais de CO ₂ e no estudo de caso italiano.....	166
Tabela 24- Base de dados na fase de reuso para o estudo de caso na Itália.....	167
Tabela 25- Resultados dos vetores prioridades obtidos através do questionário.....	214
Tabela 26- Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros de sustentabilidade na edificação em Milão.....	224
Tabela 27- Resultados dos Índices <i>Pi</i> e <i>Qi</i> das estratégias de projeto na edificação em Milão.....	225
Tabela 28- Base de dados da energia embutida ICE e na literatura brasileira.....	271
Tabela 29- Dados da ACVE das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro.....	274
Tabela 30- Dados da ACVCO ₂ das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro.....	275
Tabela 31- Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro em Florianópolis.....	276
Tabela 32- Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro em Curitiba.....	277
Tabela 33- Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro em Belém.....	278
Tabela 34- Dados da ACVE das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso italiano.....	279
Tabela 35- Dados da ACVCO ₂ das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso italiano.....	281
Tabela 36- Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso italiano.....	283
Tabela 37- Resumo dos resultados nos quatro parâmetros das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Florianópolis.....	304
Tabela 38- Resumo dos resultados nos quatro parâmetros das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Curitiba.....	304
Tabela 39- Resumo dos resultados nos quatro parâmetros das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Belém.....	305
Tabela 40- Importância relativa <i>Qi</i> e índice de prioridade <i>Pi</i> das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Florianópolis.....	305
Tabela 41- Importância relativa <i>Qi</i> e índice de prioridade <i>Pi</i> das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Curitiba.....	306

Tabela 42- Importância relativa Q_i e índice de prioridade P_i das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Belém.....	306
Tabela 43- Estratégias de projeto a ser avaliadas no ciclo de vida nos quatro parâmetros.....	312

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Escala de comparação de critérios	80
Quadro 2- Manutenção preventiva em um edificação.....	105
Quadro 3- Configuração dos parâmetros da edificação no programa <i>EnergyPlus</i>	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACCV	Análise de Custo do Ciclo de Vida
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVCO ₂	Análise das Emissões de Dióxido de Carbono no Ciclo de Vida
ACVE	Avaliação do Ciclo de Vida Energético
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers
DAP ou EPD	Declaração Ambiental de Produto ou <i>Environmental Product Declaration</i>
ENEA	Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCA	Índices dos Preços ao Consumidor Amplo
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISTAT	<i>Istituto Nazionale di Statistica</i>
MMAD	Método Multicritério de Apoio à Decisão
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PMV	Voto Médio Predito
PROCEL	Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
TCPO	Tabela de Composição dos Preços

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	33
1.1.	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA.....	33
1.2.	HIPÓTESES	37
1.3.	INEDITISMO E RELEVÂNCIA DO TEMA	37
1.4.	OBJETIVOS	38
	1.4.1. Objetivo Geral	38
	1.4.2. Objetivos Específicos	38
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO	39
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
2.1.	CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE EM EDIFICAÇÕES ...	41
2.2.	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	43
	2.2.1. Definição e fases de uma ACV.....	44
	2.2.2. Categorias de impacto.....	47
	2.2.3. Programas computacionais para ACV e bases de dados	50
	2.2.4. Avaliação do Ciclo de Vida em edificações	53
2.3.	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES	57
	2.3.1. Etapas da ACVE	57
	2.3.2. Pesquisas sobre ACVE	58
2.4.	ANÁLISE DAS EMISSÕES DE CO ₂ NO CICLO DE VIDA EM EDIFICAÇÕES	70
2.5.	ANÁLISE DE CUSTO DO CICLO DE VIDA EM EDIFICAÇÕES	72
2.6.	CONFORTO TÉRMICO NAS EDIFICAÇÕES.....	76
2.7.	MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	78
2.8.	EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS EDIFICAÇÕES	81
2.9.	SOLUÇÕES DE PROJETO PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES	83
2.10.	CONCLUSÃO DA REVISÃO	86
3.	MÉTODO.....	89
3.1.	ESCOPO DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	92
	3.1.1. Identificação da função.....	92
	3.1.2. Unidade funcional.....	93
	3.1.3. Vida útil	93
	3.1.4. Fronteiras do sistema	97
3.2.	CONFORTO ADAPTATIVO	97
3.3.	ACVE DAS ESTRATÉGIAS DE PROJETO	99
	3.3.1. Energia Embutida	99
	3.3.2. Energia Operacional	103

3.3.3.	Energia de manutenção	104
3.3.4.	Energia de Desconstrução.....	108
3.3.5.	Energia de Reuso	109
3.3.6.	Balanco Energético.....	110
3.4.	ACVCO ₂ DAS ESTRATÉGIAS DE PROJETO.....	110
3.4.1.	Emissões de CO ₂ iniciais	111
3.4.2.	Emissões de CO ₂ na fase operacional.....	114
3.4.3.	Emissões de CO ₂ na fase de manutenção	115
3.4.4.	Emissões de CO ₂ na fase de demolição	118
3.4.5.	Emissões de CO ₂ na fase de reuso	118
3.4.6.	Balanco das emissões de CO ₂	119
3.5.	ACCV DAS ESTRATÉGIAS DE PROJETO.....	119
3.5.1.	Custo Inicial.....	120
3.5.2.	Custo Operacional	121
3.5.3.	Custo de Manutenção	121
3.5.4.	Custo de Desconstrução.....	123
3.5.5.	Balanco econômico financeiro	124
3.6.	ANÁLISE DOS QUATRO PARÂMETROS DA SUSTENTABILIDADE	125
4.	ESTUDO DE CASO BRASILEIRO.....	131
4.1.	CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO.....	133
4.1.1.	Configuração do modelo residencial para simulação	135
4.1.2.	Estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro	141
4.2.	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVE	143
4.3.	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVCO ₂	146
4.4.	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACCV	147
5.	ESTUDO DE CASO ITALIANO.....	149
5.1.	CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO.....	150
5.1.1.	Configuração do modelo residencial para simulação	154
5.1.2.	Estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso italiano	156
5.2.	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVE	160
5.3.	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVCO ₂	165
5.4.	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACCV	168

6.	RESULTADOS.....	169
6.1.	ESTUDO DE CASO NO BRASIL	170
6.1.1.	Análise das condições climáticas futuras	170
6.1.2.	Conforto térmico.....	175
6.1.3.	Parâmetro energético	179
6.1.3.1.	<i>Energia Embutida</i>	179
6.1.3.2.	<i>Energia Operacional</i>	182
6.1.3.3.	<i>Energia de Manutenção</i>	185
6.1.3.4.	<i>Energia de Desconstrução</i>	188
6.1.3.5.	<i>Energia de Reuso</i>	188
6.1.3.6.	<i>Ciclo de vida energético das estratégias de projeto</i> 189	
6.1.3.7.	<i>Balanço energético</i>	192
6.1.4.	Parâmetro das emissões de CO ₂	195
6.1.4.1.	<i>Emissões de CO₂ na fase inicial</i>	195
6.1.4.2.	<i>Emissões de CO₂ na fase operacional</i>	196
6.1.4.3.	<i>Emissões de CO₂ de manutenção</i>	198
6.1.4.4.	<i>Emissões de CO₂ de desconstrução</i>	198
6.1.4.5.	<i>Ciclo de vida das estratégias nas emissões de CO₂</i> 199	
6.1.4.6.	<i>Balanço das emissões de CO₂</i>	200
6.1.5.	Parâmetro de custo.....	202
6.1.5.1.	<i>Custo inicial</i>	202
6.1.5.2.	<i>Custo operacional</i>	204
6.1.5.3.	<i>Custo de manutenção</i>	205
6.1.5.4.	<i>Custo de desconstrução</i>	206
6.1.5.5.	<i>Balanço econômico financeiro</i>	207
6.1.6.	Análise das estratégias de projeto na edificação estudo de caso através dos quatro parâmetros de sustentabilidade	209
6.1.7.	Escolha da melhor solução de projeto através do método de tomada de decisão multicritério.....	213
6.2.	ESTUDO DE CASO NA ITÁLIA	218
6.2.1.	Conforto térmico.....	218
6.2.2.	Parâmetro energético	219
6.2.3.	Parâmetro das emissões de CO ₂ equivalente	220
6.2.4.	Parâmetro de custo	221
6.2.5.	Análise das estratégias de projeto através dos quatro parâmetros da sustentabilidade	222
6.2.6.	Escolha da melhor solução de projeto através do método de tomada de decisão multicritério.....	223
7.	CONCLUSÕES.....	227
7.1.	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	233
7.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	235
	REFERÊNCIAS	237

APÊNDICE A – Questionário.....	264
APÊNDICE B – Comparação da energia embutida ICE e na literatura brasileira.....	271
APÊNDICE C– Dados das estratégias de projeto nos estudos de casos brasileiro e italiano.....	269
APÊNDICE D – Resultados no estudo de caso brasileiro.....	264
APÊNDICE E – Resultados do estudo de caso italiano.....	307
APÊNDICE F – Avaliação de categoria de impacto do potencial de acidificação no estudo de caso italiano.....	331

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Nas décadas recentes a preocupação com o meio ambiente e as graves consequências do efeito da sua excessiva exploração pelo homem provocaram um crescente interesse no desenvolvimento de pesquisas para minimizar os efeitos devastadores ao planeta. Diversas entidades governamentais e não governamentais têm se preocupado com as mudanças ambientais provocadas pela atuação do homem na natureza. Encontros internacionais foram realizados na tentativa de criar uma política mundial que reduza o uso de recursos naturais e limite a emissão de poluentes. Em janeiro de 2007, especialistas internacionais finalizaram a quarta versão do relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) da Organização das Nações Unidas (ONU), que demonstrou que há grande probabilidade de que a ação do homem esteja provocando o aquecimento global. O relatório também informou que possíveis catástrofes ambientais poderão ocorrer se medidas urgentes não forem adotadas, que a temperatura da Terra poderá subir de 1,4°C a 5,8°C até o fim deste século e que haverá aumento na intensidade de tufões e secas, além da elevação no nível dos oceanos (DELFANI; KARAMI; PASDARSHAHRI, 2010). Até 2040, o consumo energético mundial aumentará um terço em comparação com o consumo atual, como aponta estudo realizado pela *International Energy Agency* (IEA, 2016). Este aumento será alimentado, em grande parte, por fontes de energia não renováveis, agravando ainda mais o impacto ambiental.

O setor da construção civil é uma das principais causas deste cenário catastrófico. Além de ser o principal consumidor de recursos naturais, as edificações consomem grande quantidade de energia. As edificações consomem de 30 a 40% de recursos naturais e de energia primária durante todo o ciclo de vida (construção, operação, manutenção e demolição) e são responsáveis pela emissão de 40% dos gases de efeito estufa produzidos mundialmente (BANSAL; SINGH; SAWHNEY, 2014).

No Brasil, o consumo de energia elétrica nas edificações residenciais e comerciais e de serviços e públicas é bastante significativo, correspondendo a aproximadamente 50% do total da eletricidade consumida no país (BRASIL, 2016). Na Itália as edificações consomem aproximadamente 60% da energia elétrica usada no país (ENEA, 2016).

Após a crise energética mundial dos anos 70, que atingiu todos os setores da economia, a busca por edifícios mais eficientes energeticamente vem crescendo, tanto por parte de projetistas e pesquisadores quanto por usuários (MAZOUZ; ZEROUALA, 2001). O uso de estratégias de eficiência energética nas edificações, além de promover a diminuição do consumo energético nos edifícios gerando benefício econômico para o usuário, garante benefícios para toda a sociedade. A eficiência energética permite reduzir as emissões de gases de efeito estufa assim como os investimentos em infraestrutura energética e a consequente dependência de fontes de energia não renováveis de um país (TAYLOR; FRANCOEUR; TRUDEAU, 2011). Estas razões explicam o aumento das pesquisas, no campo internacional, sobre eficiência energética em edificações. Os principais estudos e regulamentos de eficiência energética em edificações apontaram como solução a redução do consumo energético na fase operacional. Através do uso de estratégias bioclimáticas ou passivas, de equipamentos eletrônicos cada vez mais eficientes, assim como a instalação de fontes de energia alternativas, as edificações podem se tornar mais eficientes energeticamente e ao mesmo tempo garantir melhor conforto para o usuário (MARDOOKHY et al., 2014).

Assaf e Nour (2015) afirmaram que através da utilização de estratégias de eficiência energética pode-se alcançar economia de energia de até 38% em novas edificações residenciais e comerciais. A eficiência energética de edifícios existentes também pode ser melhorada através de reformas que permitam reduzir o consumo de energia. No trabalho de Ma et al. (2012) verificou-se o potencial de redução do consumo de energia em edificações comerciais existentes. Os resultados obtidos demonstraram que, por meio de estratégias de eficiência energética, pode-se reduzir o consumo anual de energia em até 49%. Outra pesquisa também mostrou que, através de projetos de *retrofit* para melhorar a eficiência energética de edifícios de escritórios existentes, pode-se obter economia de até 45% (LIU et al., 2011).

No entanto, a avaliação das estratégias de projeto voltadas a melhoria da eficiência energética se vê restrita à análise do consumo na fase operacional da edificação. Da mesma forma, os principais programas internacionais de etiquetagem avaliam exclusivamente a energia consumida na fase operacional e as suas emissões relativas (BRASIL, 2012; ITÁLIA, 2015). Em nenhum momento o ciclo de vida energético é analisado. Segundo Abeysundra, Babel e Gheewala (2007), quando chegam ao local de construção do edifício, os materiais que

compõem a edificação já consumiram muita energia durante seus processos de fabricação, transporte e construção. Segundo Mulfarth (2002, p.8), “uma edificação não pode mais ser vista como uma unidade isolada, mas sim como um organismo que gera impactos ao longo de todo o seu ciclo de vida: projeto, construção, utilização, demolição, reutilização e/ou reciclagem”. Neste contexto, percebe-se a necessidade de avaliar as edificações durante o seu ciclo de vida.

Por isso, pesquisas apontam para uma abordagem mais completa, que abrange desde o processo de produção dos materiais envolvidos na construção até a fase de demolição e reciclagem. A norma ISO 14040 (2006) define Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) como uma verificação abrangente do uso de todos os insumos relativos a um processo de obtenção de um bem ou serviço e suas consequências em termos de impactos ambientais.

Apesar da grande utilidade para avaliação ambiental, as ACVs requerem tempo e recursos consideráveis para sua execução (CHEHEBE, 1998). Por isso, a partir dos anos 90, começaram a ser desenvolvidas várias pesquisas sobre avaliação de ciclo de vida em edificações tendo como foco o consumo de energia – Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) (FAY, 1999). Através de ACVE é possível avaliar o consumo energético durante o ciclo de vida de uma edificação. Tal consumo é composto de três fases principais: energia embutida, energia operacional e energia de desconstrução. A energia embutida representa uma fatia importante da energia consumida no ciclo de vida de uma edificação, seja ela residencial ou comercial. Segundo Karimpour et al. (2014), nas edificações residenciais da Austrália e da Nova Zelândia, a energia embutida pode representar entre 20 e 35% da energia consumida no ciclo de vida. Ainda na Austrália, outra pesquisa evidenciou que a energia embutida nos edifícios residenciais representou 37% da energia consumida durante todo o ciclo de vida (CRAWFORD, 2013). Isso confirma a importância de avaliar a eficiência energética das edificações durante seu ciclo de vida. Cellura et al. (2014) e Stephan, Crawford e Myttenaere (2013) também demonstraram que os edifícios considerados a energia zero ou com baixo consumo energético apresentaram energia embutida maior, entre 20% e 30% em comparação com as demais edificações. Portanto, um baixo consumo operacional da edificação pode corresponder a um maior consumo de energia embutida.

Além disso, os materiais que compõem uma edificação são uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO₂) no ambiente. Por esta razão, pesquisas internacionais e nacionais apontaram

como fundamental a avaliação do impacto ambiental das emissões de dióxido de carbono na vida útil das edificações (ATMACA; ATMACA, 2015; PEREZ et al., 2008; COSTA, 2012; CALDAS et al., 2015). Através da Avaliação do Ciclo de Vida do Dióxido de Carbono (ACVCO₂) é possível analisar o impacto ambiental de um edifício durante todo o ciclo de vida, a partir da produção dos materiais que o compõem até a sua demolição.

Quando se aborda o assunto da sustentabilidade em edificações devem ser considerados não somente aspectos ambientais, mas também aspectos de caráter econômico e sociais. Os três parâmetros, de forma conjunta, representam a maneira mais adequada de se avaliar o tema da sustentabilidade nas edificações. Recentes pesquisas internacionais analisaram o desempenho das edificações através da Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) que inclui todos os fluxos de caixa desde a primeira despesa até o fim da vida útil da edificação. Este parâmetro de avaliação é extremamente útil para identificar a estratégia ou o material mais vantajoso economicamente no ciclo de vida de um edifício, como demonstram estudos recentes (ISLAM; JOLLANDS; SETUGE, 2015b; MITHRARATNE; VALE, 2004). O aspecto social representa a temática mais complexa quando se trata de sustentabilidade em edificações. Uma forma de avaliar o aspecto social nas edificações é reduzir os impactos sobre o usuário melhorando a qualidade do ambiente interno de uma edificação. O uso de parâmetros de conforto térmico pode ser um método utilizado para analisar a sustentabilidade de uma edificação do ponto de vista social (RISHOLT et al., 2013; TALEGHANI et al., 2013; TRIANA, 2016).

Os métodos de avaliação no ciclo de vida representam uma ferramenta útil para identificar e escolher as estratégias de projeto mais adequadas nas edificações. Por outro lado, como observado em pesquisas recentes (BELLIA; DE FALCO; MINICHIELLO, 2013; AMAN et al., 2013; BLADH; KRANTZ, 2008) a escolha das estratégias de projeto se limita a analisar o desempenho das mesmas na fase operacional. A proposta deste trabalho é desenvolver um método que avalie as estratégias de projeto contemplando as diretrizes da sustentabilidade em todo o ciclo de vida e não somente na capacidade das estratégias de reduzir o consumo de energia durante a fase de uso da edificação. Através de uma análise completa que envolva questões energéticas, térmicas, ambientais e financeiras no ciclo de vida, será possível identificar a melhor solução projetual em diferentes tipologias de edificações em qualquer contexto geográfico. Assim, o projetista será

capaz de reconhecer a melhor solução para a edificação valorizando também outros aspectos tais como de conforto, ambiental e econômico, além do desempenho energético.

1.2. HIPÓTESES

A hipótese geral, que direcionou os rumos deste trabalho, é que a escolha das estratégias de projeto em uma edificação, realizada avaliando exclusivamente a eficiência energética na fase operacional não é o método mais adequado para reduzir o consumo energético e os impactos ambientais de uma edificação no seu ciclo de vida.

Através de uma análise que abrange os três pilares da sustentabilidade serão avaliadas as estratégias de projeto durante a vida útil das edificações identificando as estratégias com o menor impacto ambiental, mais eficientes energeticamente, que proporcionam melhor qualidade de vida para o usuário e com menor custo.

1.3. INEDITISMO E RELEVÂNCIA DO TEMA

Estudos relacionados à Avaliação do Ciclo de Vida vêm sendo desenvolvidos em diversos setores da economia, inclusive nos setores relacionados à indústria da construção civil.

Existem vários estudos acadêmicos relacionados a aplicações de ACV nesse setor. Encontram-se trabalhos que vão da escolha do melhor tipo de calçada através de parâmetros ambientais (OLIVER-SOLA et al., 2009) ao desenvolvimento de modelos para a comparação de diferentes plataformas de pontes segundo a ACV (KENDALL, 2004) e ao uso da ACV para reforma de estruturas de pontes e viadutos deterioradas pelo efeito do ambiente externo (KUMAR; GARDONI, 2014).

Os trabalhos em que a ACV foi utilizada para analisar as edificações são ainda mais numerosos. A maioria deles se baseia na escolha dos materiais de construção utilizados nas edificações como no caso das pesquisas desenvolvidas por Chevalier e Téo (1996), Nicoletti et al. (2002), Schmidt et al. (2004) e Traverso, Rizzo e Finkbeiner (2010).

Além dos trabalhos sobre ACV, as edificações foram objeto de estudo através da avaliação do ciclo de vida energético, de emissões de dióxido de carbono e de custo (CHASTAS et al., 2016; ATMACA; ATMACA, 2016; HONG et al., 2015; HAN; SREBIC; ENACHE-POMMER, 2014; BLENGINI, DI CARLO, 2010; TAVARES, 2006).

A pesquisa desenvolvida por Triana (2016) propôs uma abordagem integrada para a avaliação de edificações de interesse social através dos três parâmetros da sustentabilidade. O objetivo da pesquisa foi identificar o melhor cenário de projeto para o estudo de caso avaliado considerando os efeitos futuros das mudanças climáticas.

Até o momento, as principais pesquisas sobre ACVE, ACVCO₂ e ACCV focaram principalmente na avaliação da edificação como um todo ou em elementos construtivos. As estratégias de projeto visam melhorar a eficiência energética das edificações durante a fase de uso das mesmas. Por isso se faz necessário o desenvolvimento de um método que permita a escolha das estratégias de projeto mais adequadas através de uma avaliação multifatorial ao longo do ciclo de vida das edificações.

A relevância do tema está na necessidade de se criar um método que permita a correta escolha das estratégias de projeto não somente pela eficiência energética na fase de uso, mas também durante o ciclo de vida da edificação. Dessa forma, o projetista terá uma nova maneira de avaliar o real comportamento das estratégias de projeto de uma edificação para a realização de projetos de edifícios cada vez mais eficientes e sustentáveis. Além disso, através da avaliação de parâmetros diversificados, será possível identificar a solução de projeto mais adequada considerando os aspectos energéticos, térmicos, ambientais e econômicos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é propor um método de avaliação multicritério que permita analisar o desempenho das estratégias de projeto através de quatro diferentes parâmetros (energético, social, ambiental e econômico) durante o ciclo de vida das edificações, considerando os efeitos das mudanças climáticas nos edifícios.

1.4.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho se resumem a:

- Avaliar a influência das mudanças climáticas no comportamento termoenergético dos dois estudos de caso no Brasil e na Itália;

- Avaliar, através da análise do ciclo de vida energético, as estratégias de projeto mais adequadas para reduzir o consumo de energia nos dois estudos de caso no Brasil e na Itália;
- Avaliar as estratégias de projeto mais adequadas para melhorar o conforto térmico do usuário nos dois estudos de caso;
- Avaliar as estratégias de projeto através do parâmetro ambiental, ou seja, das emissões de CO₂ e CO₂eq nos estudos de caso no Brasil e na Itália, através da Análise das Emissões de Dióxido de Carbono na vida útil da edificação;
- Avaliar as estratégias de projeto dos dois estudos de caso através da Análise de Custo do Ciclo de Vida na vida útil da edificação, para identificar a estratégia de projeto economicamente mais viável;
- Verificar se existe correlação entre os quatro parâmetros utilizados para escolha das estratégias com melhor desempenho;
- Avaliar os resultados do questionário aplicado em profissionais da construção civil, para estabelecer a importância hierárquica dos diferentes parâmetros na escolha projetual;
- Definição e escolha das estratégias mais adequadas através da aplicação do método de análise de decisão multicritério.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral sobre o assunto, com a justificativa do trabalho, os objetivos a serem alcançados e a natureza inédita do tema.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre sustentabilidade em edificações e os método de Avaliação de Ciclo de Vida nas edificações. São apresentadas as principais pesquisas internacionais em matéria de ciclo de vida energético, de emissões de CO₂ e de custo nas edificações. Descreve-se ainda uma revisão das estratégias de projeto usadas na arquitetura para melhorar a eficiência energética das edificações.

O terceiro capítulo descreve o método utilizado para avaliação das estratégias de projeto nas edificações através dos quatro parâmetros empregados. As diferentes etapas da pesquisa são descritas nesta fase a partir da avaliação dos efeitos das mudanças climáticas na edificação. O primeiro parâmetro a ser avaliado são as horas de conforto do usuário na edificação com e sem a aplicação das estratégias de projeto. Após isso é apresentado o método para a avaliação do ciclo de vida energético das estratégias de projeto. Sucessivamente é apresentado o método para

avaliação do parâmetro das emissões de CO₂. O último parâmetro a ser exposto é o método para análise de custo do ciclo de vida das estratégias. Para identificar a melhor solução de projeto o método de análise de decisão multicritério é apresentado. O método proposto é utilizado para analisar quais das estratégias de projeto utilizadas nas edificações permitem obter o melhor desempenho nos quatro parâmetros durante o ciclo de vida.

No quarto e quinto capítulo são apresentadas as características dos dois estudos de caso (brasileiro e italiano) com as respectivas estratégias de projeto analisadas, assim como as diferentes bases de dados e parâmetros de simulação utilizados para a aplicação do método proposto na pesquisa.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos nos dois estudos de caso nos quatro parâmetros de sustentabilidade. Através da aplicação do método proposto foram definidas estratégias de projeto com o melhor desempenho.

Enfim, no sétimo e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados, bem como as limitações e dificuldades enfrentadas ao longo do trabalho e ainda sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aqui apresentada tem como objetivo introduzir as temáticas abordadas na pesquisa. Ela trata dos seguintes assuntos:

- Conceito de sustentabilidade em edificações;
- Método de avaliação do ciclo de vida nas edificações, em particular a avaliação do ciclo de vida energético, das emissões de CO₂ e de custos;
- Conforto térmico do usuário nos edifícios utilizado como parâmetro social na análise da sustentabilidade;
- O método de tomada de decisão multicritério;
- Os efeitos das mudanças climáticas nas edificações;
- As estratégias de projeto como instrumento para reduzir o consumo energético e melhorar o conforto térmico do usuário nas edificações.

2.1. CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE EM EDIFICAÇÕES

O conceito de desenvolvimento sustentável foi se desenvolvendo entre o final da década de 1960 e o início da década de 1970 pelo Clube de Roma, afirmando a impossibilidade de promover o crescimento econômico sem agredir o meio ambiente. O Clube de Roma, constituído por personalidades influentes do mundo todo, contratou o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) para elaborar um estudo sobre o crescimento econômico e os impactos ambientais. Este estudo relatava que somente através do crescimento zero da economia seria possível evitar catástrofes ambientais (MEADOWS et al., 1972).

O conceito e a definição de desenvolvimento sustentável surgiu alguns anos depois, em 1987, e foi descrito com estas palavras:

“O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades.... o desenvolvimento sustentável é um processo de transformação no qual a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional se harmonizam e reforçam o potencial presente e futuro, a fim de atender às necessidades e aspirações humanas” (WORLD

COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987, pg. 46).

Com o surgimento da conscientização que a preservação do ambiente era algo crucial para a garantia da continuidade futura do ser humano, algumas atividades começaram a ser abordadas mais cuidadosamente no âmbito da exploração de recursos e consumo energético. Entre elas o setor da construção civil começou também a focar e centralizar o seu desenvolvimento considerando os aspectos sustentáveis.

O conceito de desenvolvimento sustentável é baseado em três aspectos fundamentais também conhecidos como os três pilares da sustentabilidade: ambiental, econômico e social. A importância da avaliação destes três elementos nas edificações pode ser resumida desta forma:

- Ambiental: os edifícios são grandes consumidores de recursos naturais e de energia durante toda a sua existência, desde a sua concepção, construção, utilização e manutenção;
- Econômico: a construção civil é uma das atividades com maior impacto e que mais dinheiro movimenta na economia de um país, pois além das infraestruturas serem bastante dispendiosas, os edifícios de serviços e indústrias abrigam milhões de postos de trabalho que são a fonte de renda das populações;
- Social: A qualidade de vida e conforto do ser humano é fortemente dependente do ambiente construído, da qualidade das habitações e dos equipamentos existentes e disponíveis para a utilização no cotidiano.

Kibert (1994) definia a construção sustentável como: “a criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos”. Kibert (1994) estabeleceu sete princípios que, se fossem adotados pelos projetistas na fase de concepção e tendo em conta cada uma das fases do ciclo de vida dos edifícios, permitiriam construir edifícios sustentáveis. Os sete princípios são: reduzir o consumo de recursos, reutilizar recursos, utilizar recursos recicláveis, proteger a natureza, eliminar produtos tóxicos, analisar custos do ciclo de vida e assegurar a qualidade.

Mais recentemente, uma equipe de trabalho denominada CRISP (*Construction and city related sustainable indicators*), estabeleceu uma nova definição para construção sustentável que foi adotada pela norma ISO 21929-1 (2011):

“com a construção sustentável pretende-se que os produtos da indústria da construção satisfaçam os necessários requisitos funcionais com o menor impacto ambiental possível, enquanto promovem melhorias a nível econômico, social e cultural à escala local, regional e global”.

Nos últimos anos diversas pesquisas em campo internacional tiveram como objetivo principal o uso e a análise da sustentabilidade no setor da construção civil. Palmisano et al. (2016) avaliaram, através dos três fatores da sustentabilidade, a melhor forma de requalificação de edifícios rurais na região da Puglia na Itália. Através de uma análise multicritério foi possível identificar que a melhor forma de requalificação é a de reconvertê-los em edifícios turísticos. Castellano et al. (2016) avaliaram uma edificação residencial na Espanha através de um novo método que considera 71 indicadores nos três fatores da sustentabilidade. No estudo de caso avaliado, os autores concluíram que os três fatores apresentaram peso parecido na decisão final.

Através desta nova concepção os profissionais da construção civil, nas últimas décadas, estão focando cada vez mais na soma destas temáticas tendo o desafio de melhorar a qualidade de vida, o desenvolvimento econômico e a proteção do meio ambiente a fim de dar a resposta necessária para a sustentabilidade no setor construtivo. Todo este difícil processo só é possível se todos os interlocutores, desde a indústria produtora, os gestores e entidades da manutenção do edifício, os projetistas os pesquisadores, tiverem papel ativo. Esta nova forma de construir pretende satisfazer as necessidades do homem sem degradar o meio ambiente e preservando os recursos naturais.

2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Para obter edificações mais sustentáveis é necessário avaliar as mesmas em seu ciclo de vida. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) surgiu na década de 1960 como um método utilizado para a avaliação dos efeitos ambientais de um produto, processo ou atividade ao longo de todo o seu ciclo de vida. Inicialmente voltada para avaliar produtos industriais com tempo de vida de semanas ou meses, no decorrer dos anos, extrapolou seu objetivo inicial e foi aplicada em diversos campos.

Após a crise do petróleo de 1974, despertou-se nos países desenvolvidos o interesse pela melhor utilização dos recursos naturais e energéticos. Apesar disso, o primeiro estudo de ACV foi realizado dez

anos antes, em 1965, quando a Coca-Cola encomendou uma análise ao *Midwest Reasearch Institute* - MRI - para estimar os efeitos ambientais do uso de dois diferentes tipos de embalagens para refrigerantes (CHEHEBE, 1998).

Posteriormente, as principais empresas multinacionais começaram a criar centros de pesquisas que desenvolvessem estudos sobre ACV. Na Europa foi desenvolvido um procedimento chamado *Ecobalance*, que a partir de 1985 tornou-se uma referência obrigatória nas empresas da área alimentícia para o monitoramento do consumo de matérias primas e energia, além da geração de resíduos na fabricação de seus produtos. Poucos anos depois, em 1991, o Ministério de Meio Ambiente da Suíça contratou um abrangente estudo sobre materiais para embalagens que resultou em um banco de dados referencial para outros estudos, inclusive a versão do primeiro programa computacional para ACV, o Ökobase I (GUINÉE, 2001).

Inicialmente, portanto, este método era voltado especialmente para produtos industriais com tempo de vida de poucos meses. Com o passar dos anos este método mudou o seu objetivo inicial e foi aplicado em diversos campos, sendo que na indústria da construção civil, primeiramente foi empregado na avaliação de materiais de construção (BUYLE; BRAET; AUDENAERT, 2013).

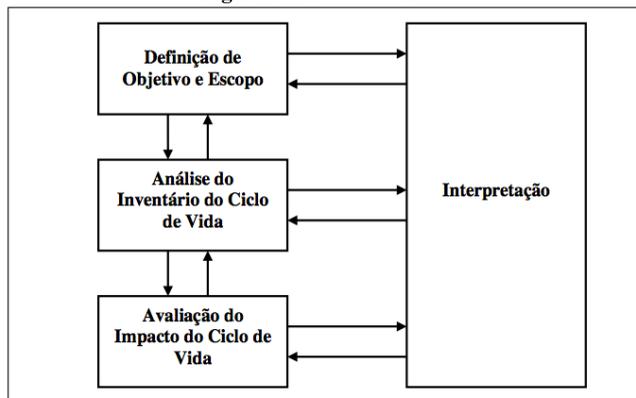
2.2.1. Definição e fases de uma ACV

A norma internacional Standard ISO 14040 (2006) define a Avaliação do Ciclo de Vida como um método de análise dos aspectos ambientais e dos impactos ao longo de toda a vida de um produto. As etapas de vida de um produto começam com a extração da matéria prima, utilizada para a produção do objeto de estudo, até a sua disposição final (reciclagem ou aterro sanitário).

Através da Avaliação do Ciclo de Vida é possível comparar o desempenho de produtos em diferentes campos, ou seja, econômico, ambiental, energético, social etc. (UNEP, 2015). Como observado, a avaliação através da ACV é um processo complexo e demorado, composto por quatro fases fundamentais de acordo com a ABNT (2009a). A Figura 1 resume as quatro fases:

- definição de objetivo e escopo;
- análise do inventário do ciclo de vida;
- avaliação do impacto do ciclo de vida;
- interpretação dos resultados do ciclo de vida.

Figura 1 – Fases da ACV.



Fonte: adaptado de ABNT (2009a).

A primeira fase da Avaliação do Ciclo de Vida é a definição de objetivo e escopo. A definição clara do objetivo é fundamental para determinar a abrangência e a profundidade do estudo sobre ACV. Embora pareça simples e óbvia, esta fase é essencial para o bom desenvolvimento de todo o estudo (RIBEIRO; SILVA, 2002). Primeiramente, deve-se estabelecer claramente o sistema de produto ou serviço, assim como o porquê e para quem será desenvolvido o estudo. Ao mesmo tempo é definida a “unidade funcional” que é diretamente ligada ao uso e à finalidade última do sistema de produto, de maneira que produtos similares ao produto avaliado possam ter um elemento de comparação. Na pesquisa de Pereira (2004), por exemplo, foi utilizada a ACV para avaliar o impacto produtivo de pisos cerâmicos. O autor define como unidade funcional a área (em m²) de piso construído. Várias pesquisas apontaram a importância da correta definição da unidade funcional na análise de um produto ou sistema (FRENETTE et al., 2010; HORNE; GRANT; VERGHESE, 2009). O escopo de uma ACV depende diretamente do seu objetivo. A definição do escopo deve incluir as informações relativas ao período do ciclo de vida assim como a posição geográfica, a tecnologia usada para o desenvolvimento do estudo e o nível de aprofundamento da pesquisa (GUINEÉ, 2001).

A ABNT (2009a) define os diferentes elementos a serem considerados na primeira fase de uma ACV:

- sistema a ser estudado;
- definição dos limites do sistema;

- definição das unidades do sistema;
- estabelecimento da função e da unidade funcional do sistema;
- procedimentos de alocação;
- requisitos dos dados;
- hipóteses de limitações;
- avaliação de impacto, quando necessária e a metodologia a ser adotada;
- interpretação dos dados, quando necessária e a metodologia a ser adotada;
- tipo e o formato do relatório e a definição dos critérios para a revisão crítica, se necessário.

Após a fase de definição de objetivo e escopo, a segunda etapa do método de ACV prevê a realização da análise de inventário do ciclo de vida. Esta etapa refere-se à coleta de dados assim como o estabelecimento dos procedimentos de cálculo para o agrupamento dos dados levantados nas diferentes categorias ambientais. A análise do inventário considera que tudo que entra deve ser igual ao que sai do sistema (em termos de energia ou massa) a partir da matéria-prima até o descarte final do produto. Por isso, esta fase é fundamental para o desenvolvimento das etapas sucessivas da metodologia e pode se tornar uma das mais difíceis e trabalhosas devido à falta de dados ou da qualidade dos dados disponíveis (FAVA, 2002).

A terceira etapa é a avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV). Esta fase consiste na identificação e avaliação dos impactos potenciais ao meio ambiente que podem ser associados aos dados levantados na fase anterior. O objetivo da AICV é, portanto, a avaliação do sistema de produto por meio dos impactos ambientais potenciais. Para fazer isso, o primeiro passo é a seleção das categorias de impacto a serem consideradas. Estas devem ser relacionadas com o estudo proposto e com os objetivos definidos na primeira fase. Dependendo do tipo de pesquisas a quantidade de categorias de impacto pode variar. No trabalho de Crawford e Treolar (2004), por exemplo, foi considerado o consumo de energia como única categoria de impacto dos produtos da construção civil. Nas pesquisas de Huberman e Pearlmutter (2007) e de Atmaca e Atmaca (2015) o consumo energético e as emissões de CO₂ são as duas categorias de impacto consideradas.

De acordo com a NBR 14042 (ABNT, 2009b), as etapas obrigatórias da avaliação do impacto do ciclo de vida são:

- seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;

- correlação dos resultados às categorias de impacto selecionadas (classificação);
- cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

A interpretação dos resultados é a última etapa da ACV. Nesta fase são avaliados os resultados obtidos no desenvolvimento da metodologia. Entretanto, o resultado final do estudo depende das hipóteses que se estabelecem durante as fases anteriores, e consequentemente das adaptações que podem vir a sofrer em função de ajustes necessários. Essa é uma das fases mais delicadas, pois estes resultados podem sofrer muitas alterações no final do estudo. A norma também estabelece a forma de apresentar os resultados através de um relatório final. O relatório deve ser completo e conter o inventário dos bancos de dados levantados nas etapas anteriores. Apesar disso, muitos estudos continuam apresentando relatórios com descrições imperfeitas do sistema de produção, prejudicando a avaliação do trabalho (HORNE, 2009).

Como pode-se perceber a ACV é um método complexo e demorado devido à dificuldade na coleta de dados ou de assegurar a qualidade dos mesmos. Autores como Ribeiro e Silva (2002) afirmaram que a ACV, embora seja um dos melhores métodos para avaliação dos impactos ambientais, possui diversos obstáculos para sua utilização.

2.2.2. Categorias de impacto

Como observado por diversas pesquisas internacionais (KYLILI et al., 2017; CABEZA et al., 2014; SILVA, 2003; TABORIANSKI; PRADO, 2001) a avaliação do ciclo de vida nas edificações é um método complexo e demorado. A seleção das categorias de impacto na ACV é um dos fatores que complicam a avaliação das edificações no ciclo de vida. Na Europa existem mais de 50 modelos de ACV (EPLCA, 2010), que avaliam de forma diferente e em diversas quantidades as categorias de impacto. As principais categorias de impacto utilizadas nos diferentes modelos são: Aquecimento Global, Demanda de Energia, Acidificação, Eutrofização, Ecotoxicidade, Toxicidade humana, Saúde e segurança no trabalho, Odor, Ruído, Radiação, Resíduos, Consumo de recursos, Alterações e impactos na diversidade biológica, Carcinógenos, Ocupação do solo, Radiação ionizante, Extração Mineral e Poluição do ar.

Recentemente, duas normas europeias definiram as categorias de impacto para analisar os materiais nas edificações e os edifícios através

da ACV (EN 15804, 2012; EN 15978, 2011). As sete categorias de impacto são:

- Potencial de Aquecimento Global (GWP, kg CO₂ eq);
- Potencial de Aquecimento Global (GWP, kg CO₂ eq);
- Potencial de depleção da Camada de Ozônio (ODP, kg CFC-11 eq);
- Potencial de Acidificação (AP, kg de SO₂ eq);
- Potencial de Eutrofização (EP, kg (PO₄)³⁻ eq);
- Potencial fotoquímico de criação de ozônio (POCP, kg de C₂H₄ eq);
- Potencial de Depleção Abiótico - não-fóssil (ADP-não-fóssil, kg Sbeq);
- Potencial de Depleção Abiótico – fóssil (ADP-fóssil, MJ valor calórico líquido).

Mesmo assim, a escolha das categorias de impacto nas principais pesquisas sobre ACV nas edificações europeias continuou a não considerar as normas existentes. A Tabela 1 apresenta as pesquisas sobre ACV, publicadas após o ano de 2011, com as sete categorias de impacto avaliadas pelas normas EN 15804 (2012) e EN 15978 (2011) e o método utilizado para caracterização dos impactos. As pesquisas apresentadas mostram um número diferente de categorias de impacto utilizadas nos estudos de ACV. O número de categorias de impacto utilizadas varia de uma a dezesseis (GUAN et al., 2016, BUYLE et al., 2015).

Na Bélgica (BUYLE et al., 2015), através da ACV e da ACVE, foram analisadas diferentes soluções de projeto para reduzir o impacto ambiental de novos edifícios. Os autores utilizaram as sete categorias de impacto da EN 15978 (2011) e outras nove categorias de impacto para investigar a melhor solução de projeto para os edifícios. Também Collinge et al. (2015) e Pombo et al. (2016) utilizaram em seus estudos as sete categorias de impacto da EN 15978 (2011). Stazi et al. (2012) estudaram 70 edifícios residenciais italianos, dos quais cinco estudos de caso foram monitorados e um caso foi submetido a uma avaliação ambiental aprofundada. Os autores usaram apenas três categorias de impacto: o Potencial de Aquecimento Global, o Potencial de Depleção da Camada de Ozônio e o Potencial de Acidificação. Motuziene et al. (2016) analisaram o ciclo de vida de uma residência unifamiliar na Lituânia considerando três categorias de impacto: Demanda de Energia Primária, Potencial de Aquecimento Global e Depleção de Camada de Ozônio. O objetivo do estudo é melhorar a eficiência energética dos

edifícios, tendo em vista o impacto no meio ambiente ao longo do ciclo de vida.

Tabela 1 – Categorias de impacto avaliadas na literatura sobre ACV nas edificações.

Categorias de Impacto EN 15804 EN 15978	Ardente et al. (2011)	Aktas e Bilec (2012)	Stazi et al. (2012)	Collinge et al. (2013)	Collinge et al. (2015)	Mastrucci et al. (2015)	Boyle et al. (2015)	Almaca e Almaca (2015)	Takano et al. (2015)	Lewandowski et al. (2015)	Motuziene et al. (2016)	Bueno et al. (2016)	Guan et al. (2016)	Pombo et al. (2016)	Ingraro et al. (2016)	Assefa e Ambler (2017)
GWP	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
ODP	x			x	x	x	x			x	x	x		x		x
AP	x	x	x	x	x	x	x			x		x		x		x
EP	x	x	x		x	x	x			x		x		x		
POCP	x			x	x	x	x					x		x		
ADP-nf					x	x	x			x				x		
ADP-f					x	x	x							x	x	x
Energia Primária	x							x	x		x		x			
Outras		2		3	-	9	9	-	-	9	-	2	-	-	1	3
Método EICV	-	TRACI	Eco-indicator 99	TRACI	-	CML2	ReCiPe	-	EPD (EN 15804)	Impact 2002+	-	EDIP 97/2003 CML 2001 Impact 2002+ ReCiPe 2008	-	OVAM MMG	Impact 2002+	-

Em algumas das pesquisas avaliadas, para simplificar a interpretação dos resultados, foi aplicada a etapa de normalização dos resultados. De acordo com a ISO 14044 (2006), a normalização é uma etapa opcional da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida que permite ao profissional expressar os resultados após a etapa de caracterização usando um impacto de referência comum. Somente algumas pesquisas utilizaram o método de normalização para avaliar e comparar os resultados finais. Assefa e Ambler (2017) analisaram os impactos ambientais do ciclo de vida potencial da construção em diferentes cenários tanto para desconstrução seletiva quanto para nova construção. Em todos os cenários o Potencial de Depleção de Camada de Ozônio resultou no maior impacto. Ingraro et al. (2016) analisaram diferentes soluções de paredes externas em edifícios. O Potencial de Aquecimento Global foi a principal categoria de impacto nas diferentes paredes analisadas. Mastrucci et al. (2015) identificaram no Potencial de

Depleção Abiótico a principal categoria de impacto ambiental das edificações avaliadas.

Como observado, as principais pesquisas internacionais sobre ACV avaliam e escolhem de forma diferente as categorias de impacto. Para um grande número de estudos sobre ACV, a escolha das categorias de impacto nem sempre é claramente especificada. A escolha dos indicadores depende muitas vezes da proposta e do objetivo final da pesquisa (ANAND; AMOR, 2017). Através da análise das principais pesquisas europeias pode-se identificar três formas para a escolha das categorias de impacto:

- 1- Seleção das categorias de impacto mais utilizadas. Entre as pesquisas avaliadas as categorias de impacto mais utilizadas foram: o Potencial de Aquecimento Global seguido pelo Potencial de Depleção da Camada de Ozônio e Potencial de Acidificação.
- 2- Seleção das categorias com maior impacto. As pesquisas avaliadas demonstraram que nem sempre as categorias de impacto mais utilizadas, como o Potencial de Aquecimento Global e a demanda de energia (nos estudos sobre ACVE), representaram as categorias mais impactantes.
- 3- Seleção das categorias de impacto através de entrevista. Através de entrevista direcionada a profissionais da área investigada será possível selecionar as categorias que resultam ser mais representativas para os entrevistados. O aspecto mais relevante é selecionar pessoas interessadas na temática da pesquisa (SOUZA et al., 2015).

2.2.3. Programas computacionais para ACV e bases de dados

Para facilitar a aplicação da ACV em produtos ou sistemas, vários programas computacionais foram desenvolvidos. A utilização de sistemas computacionais com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento dos estudos envolvendo ACV vem se tornando cada vez mais comum. Os programas computacionais para ACV permitem análise mais rápida do inventário de ciclo de vida, garantindo processamento dos dados facilitado e cálculo final de maior confiança. Uma das maiores dificuldades quando se pretende desenvolver um estudo de ACV está no levantamento da bases de dados. Os programas de ACV disponibilizam o banco de dados, o que minimiza o tempo gasto para coleta dos mesmos (NORRIS; YOST, 2002); ao mesmo tempo realizam as duas

fases finais da ACV: avaliação de impacto e interpretação (RIBEIRO, 2009).

O uso de programas computacionais, portanto, é fundamental para facilitar e desenvolver a avaliação de aspectos ambientais de produtos e sistemas inerentes à indústria da construção civil. Atualmente existem mais de 50 ferramentas de ACV que, de acordo com o tipo de produto a ser avaliado, podem ser mais ou menos adequadas para o desenvolvimento da metodologia (RODRIGUES et al., 2008). A correta escolha do programa para a elaboração da pesquisa é, portanto, fundamental (FORSEBERG; MALMBORG, 2004).

Dentre os programas computacionais presentes no mercado utilizados para análise do ciclo de vida, podem ser citados SimaPro, GaBi, Umberto e LCAiT.

O programa Holandês SimaPro permite coletar, analisar e monitorar o desempenho ambiental de produtos e serviços. O SimaPro apresenta um inventário completo na forma de bases de dados de materiais e processos, acoplados com ferramentas de cálculo de impactos. Rodrigues et al. (2008) afirmaram que este programa é um dos mais utilizados para análise ambiental de produtos e sistemas desde que foi lançado pela empresa Pré Consultants em 1990. Outro aspecto interessante do programa é a possibilidade de alterar a base de dados em função da região onde se localiza o produto avaliado (LEE; TAE; SHIN, 2009).

Outro programa computacional usado na ACV é o GaBi, desenvolvido pela empresa alemã PE *International*. Esse programa é uma ferramenta que dispõe de vários campos para uma análise bem estruturada e complexa. No entanto, aparecem problemas de ordem técnica com a praticidade de operacionalização, necessitando um grupo de especialistas para realizar um estudo completo e atendendo todos os pontos exigidos pela ferramenta.

Outro programa alemão é Umberto, desenvolvido pela Ifu Hamburg. É uma ferramenta comercializada para modelar, calcular e visualizar materiais e sistemas de fluxo de energia. Ribeiro (2009) elogiou a facilidade no manuseio e qualidade das ferramentas de apresentação dos resultados na forma de relatórios, gráficos, diagramas, tabelas etc.

LCAiT é outra ferramenta, desenvolvida pela Universidade de Tecnologia de Chalmers em 1992, que permite avaliar a ACV em produtos. Este programa possibilita uma interface amigável ao usuário. Os dados da ACV são documentados de acordo com o formato SPINE

permitindo comunicar a informação a outras partes eletronicamente e de forma transparente. Os dados, assim como a análise de impacto, incluindo a documentação, podem ser exportados ou importados de outro programa.

Aqui foram apresentados somente alguns dos diversos programas disponíveis no mercado. A maioria dos programas não é gratuita, mas possuem versão demonstrativa, porém com limitações. Por este motivo, outra forma para aplicar a ACV é utilizando fonte de dados nacionais e internacionais que fornecem valores úteis para a avaliação do ciclo de vida dos produtos. Na Europa, uma fonte de dados fundamentais para o desenvolvimento de pesquisas sobre ACV é a declaração ambiental de produto (DAP). As DAPs (EPD - *Environmental Product Declaration*) são instrumentos de informação, baseados nas metodologias ACV, que listam os processos e resultados de cada categoria de impactos ambientais de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Elas avaliam a contribuição dos materiais, atividades e processos de um produto para o meio ambiente através de um conjunto normalizado de impactos ambientais. Estes documentos são estabelecidos tendo como base regras que ditam as características ambientais dos produtos denominadas RCP – Regras para Categoria de Produtos. As RCPs estabelecem as condições fundamentais para a execução de uma DAP (EPD), das quais se salientam:

- Estabelecem os parâmetros a utilizar assim como a sua forma de obtenção;
- Expõem as etapas, processos e cenários a ser considerados do ciclo de vida de um produto;
- Possuem as regras de cálculo dos inventários de ciclo de vida e respectiva avaliação;
- Instituem as condições para a comparação de produtos com base nos dados das DAP (EPD).

No entanto, estes documentos apresentam certas incoerências que não permitem ao público-alvo obter informações claras (ANDRADE, 2013).

Outra base de dados é a *Inventory of Carbon and Energy* (ICE), desenvolvida pela Universidade de Bath (HAMMOND; JONES, 2011). Através do uso desta base de dados é possível avaliar a energia embutida e as emissões de CO₂ e CO₂ equivalente incorporadas de diversos materiais da construção civil.

Como observado, a ACV é um método que se baseia na avaliação de dados que, a cada ano, podem sofrer alterações devido a aspectos

econômicos, sociais e ambientais. Por isso, também os programas de ACV são constantemente atualizados ou modificados, para oferecer ao usuário uma ferramenta apta à correta Avaliação do Ciclo de Vida em produtos (LEE; TAE; SHIN, 2009).

2.2.4. Avaliação do Ciclo de Vida em edificações

Nas últimas décadas, também no setor da construção civil, o interesse em estudos realizados através do uso da ACV aumentou, tanto na seleção de métodos construtivos quanto para escolha de materiais e sistemas. Muitos autores definem o uso da ACV em edificações como fundamental para determinar os impactos ambientais da construção civil (KYLILI et al., 2017; CABEZA et al., 2014; SILVA, 2003; TABORIANSKI; PRADO, 2001). As formas para aplicar a ACV em edifícios são diversas.

Kilili et al. (2017) avaliaram uma edificação residencial passiva em Chipre com o objetivo de identificar o sistema construtivo mais impactante. Os resultados demonstram que o concreto é o material mais impactante nas diversas categorias.

Blengini e Di Carlo (2010) avaliaram o impacto ambiental das diferentes fases do ciclo de vida de uma edificação residencial unifamiliar. Os autores analisaram uma edificação de baixo consumo energético localizada no norte da Itália considerando um período de 70 anos. A edificação foi projetada tendo como foco a sustentabilidade. Para alcançar o escopo do trabalho, os autores compararam o edifício de baixo consumo energético com uma edificação comum. O edifício eficiente resultou ser menos impactante do que edificação comum. Mas se por um lado, no ciclo de vida, conseguiu-se reduzir os impactos ambientais finais em até 50%, nas fases de pré-utilização e manutenção a edificação eficiente se mostrou mais impactante em até 20%. Os autores concluíram que a edificação eficiente realmente se mostrou mais sustentável que as edificações comuns, mas em menor grau do que imaginado no começo da pesquisa. Este trabalho demonstrou que é necessário avaliar os impactos ambientais das edificações em todo o ciclo de vida. A fase operacional não pode ser considerada como único instrumento de análise das edificações. Edifícios eficientes energeticamente ou passivos não equivalem sempre a edificações sustentáveis.

Segundo Bribián, Usón e Scarpellini (2009), embora, como produtos, os edifícios sejam especiais devido à vida útil longa e sofrer

alterações ao longo da vida, a utilização de ACV na certificação de edifícios permite a promoção da sustentabilidade e da eficiência energética no setor da construção civil.

Lewandowska, Noskowiak e Pajchrowski (2013) também avaliaram o impacto ambiental de edificações residenciais unifamiliares passivas na Polônia através da ACV em um período de 100 anos. Os autores compararam dois edifícios residenciais passivos com dois edifícios residenciais tradicionais. As quatro edificações apresentaram resultados parecidos; as emissões de compostos inorgânicos foram o fator mais impactante e as mudanças climáticas ficaram em segundo. Os edifícios passivos apresentaram impacto ambiental inferior a 10% em comparação aos outros estudos de caso.

Do estudo das principais pesquisas internacionais foi evidente que a fase operacional é a mais impactante durante o ciclo de vida de uma edificação.

A fase pré-operacional é a segunda mais impactante no ciclo de vida de uma edificação (PEREZ; BAIRD; BUCHANAN, 2008; KOFOWOROLA; GHEEWALA 2008). Mas isso depende dos materiais utilizados na construção do edifício. A escolha dos materiais assim como dos sistemas construtivos de uma edificação podem apresentar diferentes impactos no ciclo de vida.

Kofoworola e Gheewala (2008) analisaram, através da ACV, um edifício de escritórios na Tailândia. O edifício de 38 andares se localiza na cidade de Bangkok e a sua vida útil foi estimada em 50 anos. Os autores avaliaram todo o ciclo de vida da edificação através de três categorias de impacto: aquecimento global (CO_2), acidificação do solo e potencial foto-oxidante. Os resultados mostraram que o aço e o concreto foram os materiais mais impactantes nas três categorias de impacto nas diferentes fases do ciclo de vida. Além disso, os autores ressaltaram que a fase de operação resultou ser a mais impactante nas três categorias: 52% no aquecimento global, 66% na acidificação total e 71% no potencial de formação de foto-oxidante.

No Brasil também surgiram várias pesquisas que utilizaram a ACV para avaliar o impacto ambiental dos materiais e de sistemas construtivos da construção civil (SURGELAS, 2010; MACEDO, 2011). Surgelas (2010) avaliou e comparou, através da ACV, o impacto ambiental dos blocos cerâmicos e dos blocos produzidos com resíduo de construção na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. A análise foi elaborada através de duas categorias de impacto: emissões de CO_2 e energia embutida. O bloco cerâmico resultou ser o mais impactante por

emissão de CO₂ enquanto o bloco com material de reuso apresentou maior energia embutida.

Além de avaliar o impacto ambiental de uma edificação, a ACV pode ser utilizada para identificar as melhores soluções de uma estratégia de projeto. No trabalho de Ristimaki et al. (2013) foram avaliados diferentes sistemas de aquecimento de um edifício residencial multifamiliar na cidade de Tampere, na Finlândia. As características climáticas do lugar são típicas do norte da Europa, com invernos muito frios e verões amenos. A primeira causa de consumo de energia é o aquecimento dos ambientes, que ao mesmo tempo provoca quantidades elevadas de emissões de CO₂. Foram avaliados, através da ACV e da ACCV, quatro sistemas diferentes de aquecimento: cenário base (aquecimento a gás), sistema fotovoltaico, bomba de calor e sistema integrado com fotovoltaico e bomba de calor. Os resultados mostraram que para a análise de custo a melhor escolha é o sistema integrado com fotovoltaico e bomba de calor, mesmo tendo o maior investimento inicial. Os resultados da ACV também mostraram que o sistema integrado (fotovoltaico mais bomba de calor) foi o menos impactante no ambiente permitindo reduzir as emissões de CO₂ em até 33% em comparação com os outros sistemas.

Outro aspecto fundamental quando se trata de Avaliação de Ciclo de Vida é a origem da fonte de energia utilizada no país onde se localiza a edificação avaliada. Na pesquisa de Ortiz, Castells e Sonnemann (2010) foi realizada a ACV de duas edificações residenciais em dois países: uma na Espanha e outra na Colômbia. O objetivo da pesquisa era demonstrar que o uso de diferentes fontes de energia primária pode alterar o impacto ambiental dos edifícios. As duas edificações, com características tipológicas e construtivas parecidas, foram avaliadas em dois diferentes cenários utilizando duas fontes de energia durante o uso da edificação: elétrica e gás natural. Primeiramente foi analisado o consumo na fase de uso das duas edificações: o uso de sistema de ar-condicionado resultou no maior consumo na casa espanhola (33%), enquanto na casa colombiana foram os equipamentos (55%). Os primeiros resultados mostraram que o uso do gás natural reduz o impacto ambiental nos dois diferentes estudos de caso. Na casa espanhola a redução chega a ser de 25% nos diferentes indicadores de impacto ambiental (acidificação, aquecimento global, radiações e danos à camada de ozônio), enquanto na casa colombiana é de 9%. Os autores explicaram que o resultado deve-se principalmente à matriz energética diferente entre os dois países. A Colômbia possui uma matriz energética

baseada em energia hidroelétrica (78%), enquanto na Espanha as fontes principais são combustíveis fósseis (55%) e energia nuclear (18%). Esta pesquisa apresenta um tema extremamente interessante para o desenvolvimento de trabalhos em matéria de ACV; mesmo assim, o trabalho poderia utilizar estudos de casos com consumos operacionais parecidos e ao mesmo tempo não se limitar à análise da fase operacional mas abranger todo ciclo de vida.

A maioria dos trabalhos internacionais e nacionais sobre ACV usa programas computacionais para desenvolver mais rapidamente e facilmente as pesquisas. Na maioria dos casos estes programas usam bases de dados diferentes, dificultando a escolha pelo pesquisador. Takano et al. (2014) avaliaram e compararam os resultados de cinco diferentes bases de dados através da análise do ciclo de vida de uma pequena edificação composta por um só ambiente. A edificação foi avaliada com três diferentes componentes construtivos da envoltória (painéis de madeira leve, painéis de madeira pesada e painéis de concreto), na cidade de Otaniemi, Finlândia. Os autores utilizaram como única categoria de impacto as emissões de CO₂. Independentemente dos materiais presentes na edificação, as bases de dados apresentaram diferenças de até 35%. O edifício com painéis de madeira leve resultou ser o menos impactante enquanto o edifício com painéis de concreto resultou ser o mais impactante nas cinco bases de dados.

A escolha da correta base de dados na avaliação da ACV nas edificações é uma das problemáticas mais discutidas nas pesquisas sobre Avaliação do Ciclo de Vida (YOKOO; NAOMI; OKA, 2013; CABEZA et al., 2014; MACEDO, 2011). Mesmo assim, a dificuldade de se obter uma base de dados adequada à região de estudo não diminui a importância de se aprofundar as pesquisas sobre ACV nas edificações. Soares, Souza e Pereira (2006) também evidenciaram a importância do desenvolvimento de mais pesquisa através da ACV na construção civil. Desta forma será ainda mais fácil comprovar os efeitos das edificações no meio ambiente.

A ACV aplicada nas edificações permite a obtenção de análise pontual e detalhada sobre o possível impacto que materiais e sistemas utilizados na indústria da construção civil podem gerar no ambiente. Além disso, o uso da metodologia de ACV também pode trazer vantagens econômicas ao setor, por meio de estudos detalhados das diversas fases do ciclo de vida do produto da construção civil considerado.

2.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES

A Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) é uma forma simplificada, entretanto significativa, para análise de impactos ambientais (CARVALHO, 2002). Fundamentada na ACV, preconizada pela norma ISO 14040 (2009), a ACVE prioriza o inventário de dados de consumos energéticos diretos e indiretos.

A proposta do uso da ACVE em edificações não é substituir um método de análise ambiental amplo e detalhado como é a ACV, mas facilitar as tomadas de decisões em matéria de eficiência energética e dos impactos associados nos edifícios (FAY, 1999).

2.3.1. Etapas da ACVE

O ciclo de vida energético de uma edificação se compõe de várias etapas durante as quais um edifício consome energia para sua construção, transporte de materiais, uso, manutenção até a sua demolição e eventual reuso dos materiais. A norma ISO 14040 (2009) define o conjunto de fases do ciclo de vida energético de uma edificação como energia total. A energia total é composta por três etapas: energia embutida, energia operacional e energia de desconstrução.

A energia embutida é o conjunto dos insumos energéticos, diretos e indiretos, utilizados para construir a edificação. Assim, para cada material de construção utilizado na edificação deverá ser calculada a energia embutida. A energia consumida nos processos realizados para fabricação e obtenção dos materiais de construção utilizados na edificação é denominada consumo direto. Dentre os consumos indiretos incluem-se a extração da matéria prima para produção do material, o transporte desta para a fábrica e o transporte do material pronto ao canteiro de obra, assim como a energia consumida nas fases de construção da edificação. Para o cálculo da energia embutida, as pesquisas sobre ACVE em edificações utilizaram bases de dados previamente levantadas para cada país (THORMARK, 2002; CHEL; TIWARI, 2009; CRAWFORD, 2013) ou, por falta das mesmas, dados internacionais (TAVARES, 2006; RAMESH, 2012; PAULSEN; SPOSTO, 2013).

Após a energia embutida, a etapa sucessiva do ciclo de vida energético de um edifício é a energia operacional. Durante sua vida útil, o uso de uma edificação consome energia para suprir diferentes

necessidades do usuário tais como cocção, iluminação, entretenimento, climatização e limpeza. A maioria das pesquisas utiliza como vida útil média um período de 50 anos (THORMARK, 2006; HERNANDEZ; KENNY, 2011; BRIBIAN; USON; SCARPELLINI, 2009). A energia operacional, geralmente, pode ser avaliada através de dados de consumo médio da tipologia edilícia avaliada do país (TAVARES, 2006) ou através de simulações de uso e ocupação da edificação que determinam o consumo final (BELLIA; DE FALCO; MINICHIELLO, 2013).

Durante a fase de uso, ao longo dos anos, as edificações são sujeitas a reformas devido a numerosos fatores tais como a durabilidade dos materiais, senso estético ou novas exigências funcionais do usuário. A energia consumida nesta fase pode ser denominada energia embutida de manutenção ou energia recorrente e pode ser incluída na fase inicial do ciclo de vida (energia embutida).

A última etapa do ciclo de vida energético é a energia de desconstrução que é a energia consumida por descarte, deposição ou reciclagem dos materiais da edificação. Nesta fase consideram-se todos os consumos de energia devidos a demolição, desmontagem da edificação e transporte dos resíduos dos materiais da construção. A reciclagem ou reaproveitamento dos materiais podem ser considerados como crédito de energia embutida contabilizado nas novas edificações que utilizarem estes materiais (ADALBERTH, 1997; FAY, 1999; SCHEUER; KEOLEIAN; REPPE, 2003; TAVARES, 2006; NG; CHAU, 2015). Thormark (2006), de outra maneira, considera o potencial de reciclagem e de reuso juntamente com a energia embutida e operacional para dar mais importância a este fator já na tomada de decisão inicial.

Para contabilizar a ACVE em edificações, as unidades funcionais mais utilizadas internacionalmente são GJ/domicílio ou GJ/m². Pode-se usar kWh/m² para considerações específicas de energia elétrica. Além disso, ao comparar o consumo de energia das diferentes etapas do ciclo de vida energético de uma edificação é muito recorrente o uso de valores em porcentagem.

2.3.2. Pesquisas sobre ACVE

Nas últimas décadas as pesquisas de Avaliação do Ciclo de Vida Energético nas edificações cresceram no mundo todo. A ACVE em edificações é aplicada em países como Austrália, Bélgica, China, Itália, Suécia e EUA (CRAWFORD, 2013; STEPHAN et al., 2013; HONG; SHEN; FENG, 2013; BECCALI et al., 2013; THORMARK, 2006;

SCHEUER; KEOLEIAN; REPPE, 2003). No Brasil, as pesquisas que avaliam o ciclo de vida energético em edifícios são muito recentes devido à falta de uma ampla base de dados sobre energia embutida dos materiais (TAVARES, 2006; LOBO; TAVARES; FREITAS, 2009; MORAIS; SPOSTO, 2010; PAULSEN; SPOSTO, 2013; INVIDIATA; GHISI, 2016a; TRIANA, 2016).

A seguir são apresentados os principais trabalhos internacionais e nacionais em matéria de Avaliação de Ciclo de Vida Energético em edificações. Os resultados apresentados nas pesquisas mostram valores com unidades de medida diferentes tais como MWh, GJ/m², kWh/m² ou em porcentagem.

Sartori e Hestnes (2007) fizeram um levantamento das principais pesquisas internacionais, das últimas décadas, em matéria de ciclo de vida energético nas edificações residenciais e comerciais. Foram analisados 60 estudos de casos em diferentes países do mundo. Os resultados apresentaram dados extremamente diferentes entre as pesquisas analisadas; a energia embutida variou entre 9% e 46% da energia consumida no ciclo de vida. Os autores afirmaram que isso pode depender de numerosos fatores como a vida útil considerada na avaliação, a localização da edificação, o tipo de edificação, a base de dados utilizada para o cálculo da energia embutida assim como a energia primária de cada país. Além disso, a pesquisa mostrou que a energia embutida varia de acordo com a eficiência energética na fase de operação dos edifícios. Os autores demonstraram que as edificações passivas (mais eficientes na fase operacional) apresentaram energia embutida maior em comparação com as outras edificações. Isso demonstra que existe relação entre energia operacional e energia embutida: ao diminuir a energia operacional de uma edificação há a tendência da energia embutida aumentar.

Cellura et al. (2014) analisaram as principais pesquisas em campo internacional em matéria de ACVE de edificações residenciais com baixo consumo energético. Os resultados do levantamento mostraram que a energia embutida das edificações é de 10–100 kWh/m² por ano, entretanto, as pesquisas evidenciaram uma diferença de valores dependendo do clima local. Em climas frios as casas apresentam valores de energia embutida mais baixos (10–55 kWh/m² por ano), enquanto os edifícios localizados em zonas climáticas mais quentes apresentaram energia embutida superior, entre 30 e 70 kWh/m² por ano. Os autores concluíram que a energia embutida nas edificações pode representar até 35% da energia consumida durante o ciclo de vida.

Chastas et al. (2016) estudaram noventa pesquisas internacionais sobre a ACVE de edificações residenciais. O objetivo do estudo foi demonstrar a importância de avaliar as edificações durante todo o ciclo de vida e não somente na fase operacional. Os autores evidenciaram que as edificações a energia zero e passivas apresentam energia embutida 50% maior do que nos edifícios comuns.

Os trabalhos apresentaram conclusões muito diferentes entre si. A não uniformidade dos resultados depende de diversos fatores, dentre eles o tipo de edifício, a tipologia construtiva, o clima onde se localiza a edificação e o uso do edifício assim como as diferentes bases de dados utilizadas (YOKOO; NAOMI; OKA, 2013; TAKANO et al., 2014). Partindo destas primeiras considerações, a seguir são apresentados trabalhos que avaliaram edificações individualmente.

A edificação residencial é a tipologia mais avaliada através do método da ACVE. Várias pesquisas internacionais e nacionais (TAVARES, 2006; CABEZA et al., 2010; RAUF; CRAWFORD, 2013; PAULSEN; SPOSTO, 2013; TRIANA, 2016) focaram na avaliação das edificações residenciais para comprovar a importância do uso desta metodologia para reduzir o consumo energético. Segundo Cabeza et al. (2014), mais de 70% das pesquisas sobre ACVE se concentram em edificações residenciais. Isto se deve principalmente ao fato das edificações residenciais representarem a maioria dos edifícios existentes no território mundial (75% na União Europeia) e, conseqüentemente, o maior consumo de energia (BPIE, 2011). A partir disso foram avaliadas as principais pesquisas sobre edifícios residenciais em matéria de ACVE. Tentou-se organizar os trabalhos de acordo com a região geográfica e a tipologia de edificação residencial.

Além dos materiais, a vida útil de uma edificação também pode modificar os resultados da ACVE. Em outra pesquisa, Rauf e Crawford (2015) evidenciaram que estendendo a vida de uma edificação residencial de 50 até 150 anos a energia embutida se reduz em 29%. Este aspecto demonstra que a escolha de todos os fatores da ACVE deve ser bem ponderada, pois pode modificar os resultados da pesquisa de forma significativa.

Bribian, Usón e Scarpellini (2009) avaliaram o ciclo de vida energético de uma edificação residencial unifamiliar de 220 m² com vida útil de 50 anos na Espanha. O banco de dados utilizado na pesquisa foi desenvolvido pela *Catalonia Institute of Construction Technology* (2009). Os resultados evidenciaram que a energia embutida representou 31% (170 MWh) da energia consumida durante todo o ciclo de vida do

edifício correspondente a 548 MWh. Normalmente, a causa principal do consumo de energia em edifícios residenciais nesta região é o aquecimento dos ambientes. Esta pesquisa revelou que a segunda causa de consumo em edifícios residenciais foi o de materiais de construção (energia embutida), que representou 60% do consumo de aquecimento.

Chang, Ries e Wang (2011) avaliaram o ciclo de vida energético das edificações residenciais e comerciais na China. O país, nos últimos vinte anos, teve um crescimento econômico sem igual, provocando também forte aumento do consumo energético nas edificações. Além disso, o setor da construção civil representa a primeira fonte de consumo de energia no país. Os resultados mostraram que a energia embutida nas edificações (residenciais e comerciais), avaliada através da base de dados nacional, representou de 25 a 30% da energia consumida durante todo o ciclo de vida. Os autores afirmaram que é fundamental avaliar o consumo energético das edificações em todo o ciclo de vida a partir da produção dos materiais de construção. Portanto, a preocupação em reduzir o consumo energético começa nas primeiras etapas de projeto.

Na China também foi analisado o ciclo de vida energético de duas tipologias de edifícios residenciais: rurais e urbanos. O escopo da pesquisa era verificar se entre as duas tipologias existia diferença significativa no consumo energético durante o ciclo de vida. Os resultados mostraram que os edifícios rurais apresentaram energia embutida até 20% inferior à dos edifícios residenciais urbanos (CHANG et al., 2013). Isso se deve ao uso de materiais de construção mais simples que em muitos casos são produzidos pelos próprios moradores, como blocos e telhas de barro.

Como demonstraram os trabalhos desenvolvidos na China, o uso de materiais mais tecnológicos (alumínio, aço, vidro duplo etc.) se de um lado pode resultar eficaz para reduzir o consumo de energia na fase operacional, por outro lado pode aumentar a energia embutida da edificação. A correta escolha dos materiais de construção de um edifício é fundamental para melhorar a eficiência energética dele, e deve ser ponderada entre o melhor desempenho operacional e a própria energia embutida.

Até agora foram analisados edifícios residenciais comuns. Nas últimas décadas, os principais países desenvolvidos vêm incentivando o projeto e construção de edificações mais eficientes, para reduzir o consumo durante a fase operacional. Mas como o comportamento destas edificações se traduz no desempenho energético durante o ciclo de vida?

Pesquisas internacionais tentaram mostrar qual é o real desempenho energético de edifícios residenciais “eficientes” através da ACVE.

Em uma pesquisa desenvolvida na Suécia, foi avaliado o ciclo de vida energético de uma edificação residencial multifamiliar com baixo consumo energético operacional (THORMARK, 2002). O edifício é composto por vinte apartamentos e para avaliar o seu ciclo de vida energético foi considerada vida útil de 50 anos. Para enfrentar condições climáticas de extremo frio, o edifício possui isolamento térmico na envoltória, que permite reduzir o consumo de energia para aquecer os ambientes durante o seu uso. O autor, para avaliar a energia embutida dos materiais da edificação, utilizou dados provenientes da literatura. Os resultados obtidos mostraram que a energia embutida representou 40% (7033 MJ/m²) da energia consumida em todo o ciclo de vida. Além disso, o autor avaliou a energia consumida para a manutenção da edificação no período de 50 anos. O resultado da energia de manutenção representou 12% da energia embutida final.

Em outro trabalho, Thormark (2006) continuou a Avaliação do Ciclo de Vida do edifício residencial anteriormente analisado. O objetivo do autor foi demonstrar a importância da fase de reuso e reciclagem de uma edificação, uma vez acabada a vida útil da mesma. Os resultados mostraram que o reuso dos materiais no fim da vida útil da edificação pode reduzir de 10 a 15% a energia embutida. O autor concluiu a pesquisa afirmando a importância da escolha correta dos materiais de construção na fase de projeto para reduzir a energia embutida e melhorar a eficiência energética dos edifícios.

Stephan, Crawford e Myttenaere (2013) avaliaram o ciclo de vida energético de um edifício residencial unifamiliar passivo na Bélgica com uma vida útil de 100 anos. Os edifícios passivos no norte da Europa são projetados para garantir menor consumo de energia para aquecimento dos ambientes durante a vida útil deles. Por outro lado, ao reduzir a energia operacional das edificações aumenta-se o consumo da energia embutida. A base de dados de energia embutida foi encontrada na literatura internacional. Os resultados apontaram que a energia embutida em uma casa passiva pode representar até 56% (47,1 GJ/m²) da energia consumida durante seu ciclo de vida. Além disso, foi comparado o desempenho energético da casa passiva com duas edificações: uma casa e um apartamento reformado, localizados na mesma região e com as mesmas características de forma e uso. Enquanto a casa apresentou consumo energético total parecido com a casa passiva (0,6% a mais de diferença) o apartamento exibiu consumo, em todo o ciclo de vida, 41%

maior e energia embutida 21% menor (37 GJ/m^2). Observou-se que é fundamental rever a definição de casa passiva incorporando na avaliação dos edifícios a energia embutida como parâmetro de análise.

Cellura et al. (2014) avaliaram o ciclo de vida energético de uma edificação residencial unifamiliar passiva na Itália com uma vida útil de 70 anos. O estudo de caso avaliado pelos autores foi uma residência unifamiliar localizada na região central da Itália, onde a temperatura varia entre -5°C e 37°C durante o ano. A energia embutida da edificação, avaliada através da base de dados presente no programa SimaPro, foi de 108 kWh/m^2 por ano, o que representa 68% da energia de todo o ciclo de vida. Os autores concluem a pesquisa sugerindo mudança nos regulamentos internacionais e das certificações energéticas das edificações, repensando também o conceito de edifícios a energia zero. A proposta dos autores foi incluir a energia embutida nos diferentes processos de análise e certificação das edificações.

As pesquisas apresentadas mostraram que para considerar uma edificação a energia zero, esta deve ser avaliada em seu ciclo de vida energético e não exclusivamente na fase operacional. A energia embutida representa parcela significativa da energia consumida no ciclo de vida de uma edificação, que resulta ser ainda mais expressiva em edifícios energeticamente eficientes. Em comparação com as edificações comuns, os edifícios eficientes apresentam energia embutida maior. Portanto, baixo consumo de energia durante a fase operacional corresponde a maior energia embutida na edificação. Por isso, a crítica levantada pelas principais pesquisas é como uma edificação pode se definir a baixo consumo energético ou até edifício a energia zero sem considerar todo ciclo de vida. Os regulamentos internacionais em matéria de certificação energética das edificações também focam na avaliação da eficiência energética dos edifícios unicamente na fase operacional.

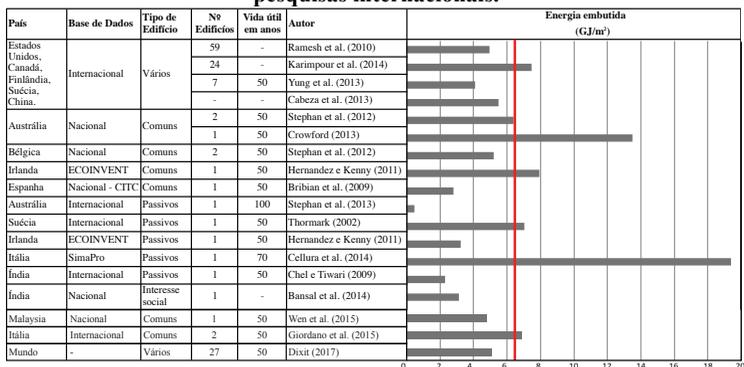
Hernandez e Kenny (2011) propuseram uma metodologia para incorporar a energia embutida na classificação energética dos edifícios residenciais. A metodologia foi aplicada para a certificação energética irlandesa de edifícios residenciais tendo como estudo de caso uma residência unifamiliar de dois andares com vida útil de 50 anos. As condições climáticas do país são de frio durante a maioria dos meses do ano. Um caso base foi usado para simular os diferentes níveis de certificação energética (D1 até A+). De acordo com os diferentes níveis, mudaram-se as características dos materiais usados na envoltória assim como o sistema de aquecimento. Através desta pesquisa pode-se

demonstrar que a energia embutida influencia a certificação energética contribuindo para o aumento do consumo de energia da edificação. Assim, o edifício com o nível A+, mesmo sendo o mais eficiente energeticamente, apresentou a energia embutida mais elevada (44 kWh/m^2) enquanto o edifício com nível D1 apresentou a menor energia embutida (18 kWh/m^2). O estudo questionou também a definição de edifícios a energia zero (nível A+, A1 e A2), enquanto a energia embutida não é considerada nesta definição. O objetivo da pesquisa foi demonstrar a urgência de integrar o ciclo de vida energético das edificações nos métodos de avaliação e de certificação energética para permitir uma visão mais correta na definição de edifícios energeticamente eficientes.

Além da importância de integrar a energia embutida na avaliação da eficiência energética nas edificações, estudos recentes têm demonstrado que o consumo derivado do transporte do usuário (energia de transporte) seja um elemento a ser considerado quando se trata de ACVE. Energia embutida e energia de transporte podem representar mais da metade da energia consumida durante o ciclo de vida de mais de 50 anos de uma edificação. Stephan, Crawford e Myttenaere (2012) mostraram a importância de avaliar a eficiência energética nas edificações não somente na escala de construção mas também na energia consumida pelo usuário para a sua mobilidade urbana. A pesquisa foi realizada através do desenvolvimento de um programa computacional que permitia a rápida análise da demanda de energia do ciclo de vida dos edifícios em diferentes escalas. Os resultados de dois estudos de caso, duas edificações residenciais unifamiliares localizadas uma em Bruxelas, na Bélgica, e outra em Melbourne, na Austrália, confirmaram que os dois parâmetros apresentam o mesmo peso no consumo de energia das edificações. No edifício Australiano, a energia embutida representou 27% (6950 GJ), a energia de transporte foi de 34% e a energia operacional, 37%. A edificação em Bruxelas apresentou dados parecidos, com energia embutida de 44% (8523 GJ), energia de transporte de 26% e energia operacional de 30%.

As pesquisas internacionais sobre ACVE em edifícios residenciais apresentaram resultados diversos entre si. A Figura 2 resume os resultados das diferentes pesquisas sobre a energia embutida em edifícios residenciais. A energia embutida média é de $6,2 \text{ GJ/m}^2$ com desvio padrão de $4,6 \text{ GJ/m}^2$.

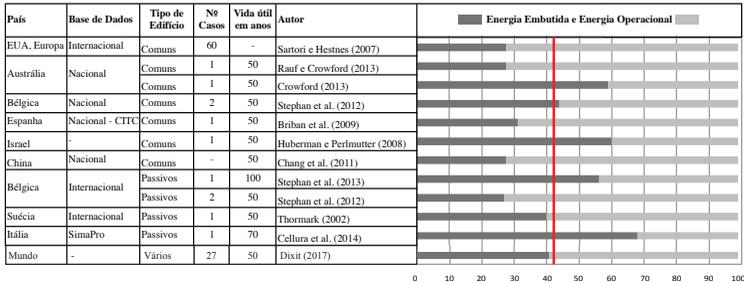
Figura 2 – Energia embutida (GJ/m²) em edifícios residenciais em pesquisas internacionais.



As pesquisas que também apresentaram resultados em porcentagem demonstraram que existe diferença significativa entre os trabalhos. A energia embutida média resultou ser de 40,5% da energia consumida durante todo o ciclo de vida, com desvio padrão de 14,8% (Figura 3).

Estas diferenças são devidas a diversos elementos já apresentados nas pesquisas internacionais. Dixit et al. (2010) evidenciam que os principais fatores que provocam esta diversidade nos resultados da ACVE são: os métodos de medição da energia embutida, considerações das fontes de energia primária, a idade das fontes, a tecnologia usada para fabricação dos materiais assim como a localização geográfica. O clima onde se localiza a edificação, precisamente, é um dos elementos que mais influencia os resultados. Em geral, percebe-se que a energia embutida tende a aumentar em regiões mais quentes (CRAWFORD, 2013), determinando aumento do consumo de energia durante o ciclo de vida. Além disso, outro elemento relevante é que os edifícios, tanto unifamiliares quanto multifamiliares, projetados para ser mais energeticamente eficientes durante a fase de operação (edifícios passivos, verdes ou energia zero) apresentaram energia embutida maior. Os trabalhos demonstraram que existe relação entre energia operacional e energia embutida de uma edificação: a redução do consumo de energia operacional implica em maior energia embutida (CELLURA et al., 2014; HERNADEZ; KENNY, 2011).

Figura 3 – Energia embutida (%) em edifícios residenciais em pesquisas internacionais.



Este aspecto é de extrema relevância também no desenvolvimento desta tese, demonstrando a necessidade de avaliar as estratégias de projeto não somente para melhorar o comportamento energético na fase operacional mas durante o ciclo de vida.

Os resultados obtidos do levantamento das principais pesquisas internacionais em matéria de edifícios residenciais mostraram a importância de avaliar a eficiência energética das edificações durante todo ciclo de vida. A energia embutida apresentou parcela significativa no consumo de energia de uma edificação residencial, enquanto a energia de desconstrução apresentou valores poucos relevantes e raramente foi estudada.

Através da ACVE começaram a ser analisados os componentes construtivos e os materiais mais impactantes energeticamente em uma edificação. Asif, Muneer e Kelley (2007) avaliaram quais dos materiais de construção de uma edificação residencial unifamiliar na Escócia apresentam maior energia embutida. Os resultados mostraram que a energia embutida do estudo de caso foi de 227,4 GJ. Entre os materiais de construção usados na edificação, o concreto, a madeira e a telha cerâmica foram os materiais com maior energia embutida. O concreto representou 65% da energia embutida total da casa enquanto a madeira e a telha cerâmica representaram, respectivamente, 13% e 14%. Com este trabalho os pesquisadores demonstraram a importância da correta escolha dos materiais das primeiras fases de projeto considerando o ciclo de vida energético deles.

A escolha correta dos materiais de um edifício pode reduzir de forma considerável o consumo de energia no ciclo de vida. Os materiais de construção das edificações, durante os diferentes processos de

produção, consomem grandes quantidades de matérias primas, energia e ao mesmo tempo emitem gases de efeito estufa. Em outra pesquisa desenvolvida na Índia foram avaliados os efeitos ambientais de alguns dos materiais de construção mais usados na região (REDDY; JAGADISH, 2003). Foram levantados os dados de energia embutida de diferentes materiais de construção produzidos naquele país. O estudo apontou o alumínio, com 236,8 MJ/kg, como o material com a energia embutida mais elevada. Outro dado interessante foi que o transporte do material representou uma parcela pequena, entre 5% e 10%, da energia consumida na produção, de tijolos cerâmico. Os autores, após esta análise, compararam a energia embutida de cinco diferentes coberturas de edificações. A avaliação serviu como exemplo para demonstrar que através de análise prévia da energia embutida dos materiais da construção pode ser identificada a escolha projetual mais adequada.

Também na Índia, Ramesh (2012) demonstrou a importância de avaliar a escolha dos materiais de construção através da análise da energia embutida. O autor analisou diferentes tipos de materiais (concreto, vidro, alumínio, cerâmica etc.) tendo como objetivo identificar qual deles permitiria obter a menor energia embutida na construção de uma varanda de 100 m² de uma edificação residencial. Primeiramente foi realizado o levantamento de uma base de dados para avaliar a energia embutida dos diferentes materiais. Os dados foram coletados da literatura internacional. A energia embutida do vidro e do alumínio apresentou resultados diferentes das pesquisas analisadas anteriormente, variando de 15,9 MJ/Kg (CHEL; TIWARI, 2009) a 349,9 MJ/kg (BRIBIAN et al., 2009) para vidros duplos por exemplo. Isso demonstra que a escolha da base de dados pode afetar os resultados finais da pesquisa. Para o transporte dos materiais o autor adotou o valor de 1 MJ/tonelada/km (diesel). Dependendo do tipo de material utilizado, a economia na energia embutida pela construção da varanda foi de até 28,5% (em tijolos cerâmicos). Além disso, foi feita uma análise de custos, na qual observou-se que não existe relação entre energia embutida e custos; assim, a varanda construída com argamassa de cal apresentou o menor custo, mas ao mesmo tempo a maior energia embutida. O autor concluiu que a avaliação da energia embutida dos materiais é fundamental para reduzir o consumo energético nas edificações e ao mesmo tempo para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Além da análise do ciclo de vida energético dos materiais individualmente, a ACVE é um importante instrumento para avaliar e

comparar os impactos ambientais de diferentes sistemas construtivos das edificações. As escolhas projetuais mais adequadas em termos ambientais e energéticos devem considerar o ciclo de vida dos materiais da construção (TAKANO et al., 2015; MITHRARATNE; VALE, 2004; BECCALI et al., 2013).

Na Austrália uma edificação multifamiliar foi avaliada com três diferentes métodos construtivos: em concreto, em módulos pré-fabricados de aço e módulos pré-fabricados de madeira (AYE et al., 2012). Os resultados apontaram que a energia embutida na edificação em módulos pré-fabricados em aço é 30% maior que nos outros dois métodos construtivos. Da mesma forma, o consumo de energia da edificação em aço em todo o ciclo de vida foi 17% e 11% superior ao das edificações em concreto e em madeira, respectivamente. Os autores concluíram a pesquisa ressaltando a importância do uso de materiais naturais e locais para a redução da energia embutida e das emissões de gases de efeito estufa no ambiente.

As estratégias de eficiência energética são um importante instrumento para reduzir o consumo de energia nas edificações. A eficácia delas é determinada pelo desempenho energético durante a fase de operação dos edifícios. Recentes pesquisas estão tentando avaliar o comportamento das estratégias de projeto voltadas a reduzir o consumo de energia no ciclo de vida energético (KNEIFEL, 2010; BECCALI et al., 2013).

Até agora foi mostrado que as pesquisas sobre ACVE realizadas internacionalmente tiveram uma grande evolução. Os pesquisadores perceberam a necessidade de utilizar a ACVE como instrumento de análise e de projeto para obter edifícios energeticamente mais eficientes e ao mesmo tempo mais sustentáveis. Por isso é evidente a importância do desenvolvimento de um método que permita analisar a eficácia das estratégias de projeto voltadas a melhorar a eficiência energética através da ACVE. Pode-se verificar que a energia embutida tem influência significativa no ciclo de vida energético de uma edificação. Também percebe-se que os principais trabalhos foram realizados nos Estados Unidos, na Europa, na Austrália e nos países asiáticos, em condições climáticas muito diferentes entre si e com características construtivas distintas.

No Brasil as principais pesquisas sobre a Avaliação do Ciclo de Vida Energético em edificações são muito recentes (TRIANA, 2016; SILVA, 2012; KALBUSCH; GHISI, 2012). Os trabalhos analisados focam principalmente na avaliação de edifícios residenciais. Os autores

apontam como maior dificuldade para o desenvolvimento das mesmas, a ausência de uma base de dados sobre a produção dos materiais da construção civil.

Paulsen e Spoto (2013) avaliaram o ciclo de vida energético de uma edificação de interesse social localizada em Brasília com vida útil de 50 anos. Para fazer a avaliação energética da energia embutida dos materiais foram usados dados nacionais juntamente com dados internacionais. A energia embutida equivale a 30% ($7,2 \text{ GJ/m}^2$) da energia total consumida na edificação. Os materiais cerâmicos representam 44% da energia embutida. Em comparação com outras pesquisas sobre ACVE, o consumo de energia na fase operacional é relativamente baixo, ou seja, é a metade em comparação com as pesquisas internacionais. Isto se deve principalmente ao consumo para aquecimento dos ambientes que nos edifícios residenciais europeus apresenta a maior parcela de consumo de energia.

Na tese de Tavares (2006) foram avaliados cinco modelos de edifícios residenciais brasileiros considerando um ciclo de vida de 50 anos. O consumo operacional de energia foi baseado nos dados do levantamento da Pesquisa de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos do PROCEL. Os dados relativos à energia embutida dos materiais foram levantados em parte pelo autor, através de levantamentos de dados de diferentes empresas de produção de materiais, e através de dados fornecidos em outras pesquisas nacionais. Percebe-se também como os dados relativos à energia embutida apresentam, em alguns materiais, diferenças significativas em comparação com as pesquisas internacionais. Por exemplo, a energia embutida do vidro produzido no Brasil é de $18,5 \text{ MJ/kg}$, que é similar ao valor apresentado na pesquisa de Chel e Tiwari (2009), mas baixo em comparação com as outras bases de dados. Em geral percebe-se que a base de dados apresentada por Tavares (2006) mostra valores parecidos com as pesquisas da Índia e inferiores aos dos outros trabalhos internacionais. Isto pode depender da matriz energética assim como da disponibilidade de matéria-prima no território brasileiro que reduz a energia embutida para produção dos materiais. Os resultados do trabalho entre os cinco modelos apresentam valores de consumo energético, em todo o ciclo de vida, na ordem de $15,01 \text{ GJ/m}^2$ a $24,17 \text{ GJ/m}^2$, considerados baixos em comparação aos valores internacionais de países desenvolvidos, na ordem de 50 GJ/m^2 a 90 GJ/m^2 , onde as condições climáticas elevam o consumo operacional para climatização. O autor avaliou a energia embutida em duas fases: a energia embutida inicial e a energia embutida

total que considera também a energia de manutenção. A energia embutida inicial variou de 4,10 GJ/m² a 4,90 GJ/m² e a total de 5,74 GJ/m² a 7,32 GJ/m². Tais resultados equivalem de 29% a 49% de todo o ciclo de vida, o que destaca a relevância dos estudos sobre ACVE.

A energia embutida dos materiais produzidos no Brasil foi outro tema desenvolvido em pesquisas nacionais. Moraes e Sposto (2010) compararam a energia embutida dos revestimentos cerâmicos e em granito para sistemas de fachada. As etapas analisadas são extração, fabricação e transporte e os materiais seriam aplicados em Brasília, Distrito Federal. O material com a menor energia embutida foi o revestimento em granito, 3411,1 a 3899,5 kJ/kg, enquanto o revestimento cerâmico obteve resultado entre 4211,7 e 4443,7 kJ/kg.

As pesquisas brasileiras apresentaram resultados da ACVE parecidos entre si. Em comparação com as pesquisas internacionais os valores de energia embutida dos edifícios residenciais apresentaram valores menores devido a diferença na base de dados sobre a energia embutida e ao menor consumo na fase operacional dos edifícios. Além disso, as pesquisas analisadas não consideraram a influência das condições climáticas no consumo da edificação. Este elemento é de grande importância considerando a variedade climática do Brasil e das consequentes diferenças de consumo das edificações durante a fase operacional do ciclo de vida. Enfim, os autores das pesquisas evidenciaram as dificuldades no levantamento da base de dados sobre a energia embutida dos materiais de construção.

2.4. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE CO₂ NO CICLO DE VIDA EM EDIFICAÇÕES

Um dos principais impactos ambientais causados pelo setor da construção civil é a emissão de gases de efeito estufa. Os gases do efeito estufa são substâncias gasosas que absorvem parte da radiação infravermelha dificultando a saída para o espaço da radiação solar que é refletida pela Terra. Isso impede que ocorra uma perda excessiva de calor para o espaço, mantendo a Terra aquecida. O aumento dos gases estufa na atmosfera têm potencializado esse fenômeno natural, causando um aumento da temperatura e o fenômeno conhecido com o nome de aquecimento global (ATMACA; ATMACA, 2015; MOTUZIENE et al., 2016). Dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) são os gases considerados mais importantes causadores do efeito estufa. No setor da construção civil o CO₂ é considerado um dos fatores mais

importantes no efeito radioativo, sendo em torno de 55% das emissões causadas por ele (BUCHANAN; HONEY, 1994).

Por estas razões a avaliação das emissões de CO₂ em uma edificação é de fundamental importância para analisar os seus impactos ambientais. Através da análise das emissões de CO₂ no ciclo de vida (ACVCO₂) é possível avaliar as emissões geradas pelas edificações. A avaliação das emissões de CO₂ é, juntamente com a demanda de energia primária, uma das categorias de impacto mais recorrentes nos estudos de ACV nas edificações (ARDENTE et al., 2011; ATMACA; ATMACA, 2015; MOTUZIENE et al., 2016). Na maioria das pesquisas internacionais, a avaliação das emissões de CO₂ e de energia primária são analisadas de forma conjunta. Como para a ACVE, as etapas que compõem a ACVCO₂ nas edificações são principalmente três: emissões embutidas (ou incorporadas), emissões na fase operacional e emissões de desconstrução.

Há algumas pesquisas nacionais e internacionais que avaliaram o comportamento das edificações no ciclo de vida considerando o impacto ambiental das emissões de CO₂ (CUÉLLAR-FRANCA; AZAPAGIC, 2012; COSTA, 2012; ATMACA; ATMACA, 2015).

Cuéllar-Franca e Azapagic (2012) avaliaram três edificações residenciais unifamiliares típicas do Reino Unido: independente, geminada e geminada composta. Todas as etapas da ACV foram consideradas, da construção até a demolição depois de 50 anos. Os autores utilizaram como única categoria de impacto as emissões de CO₂ equivalente geradas nas diferentes fases do ciclo de vida. Dentre as três edificações, a edificação independente resultou ser a mais impactante, com 455 t de CO₂ equivalente, seguida pela casa geminada, com 374 t de CO₂ equivalente, e pela casa geminada composta, com 309 t de CO₂ equivalente. Cerca 90% do potencial de aquecimento global de CO₂ foi gerado na fase operacional enquanto apenas 9% na fase pré-operacional e 1% na fase de demolição das edificações. Além disso, os autores mostraram que o potencial de reciclagem dos materiais das edificações, na etapa final da ACV, pode reduzir o aquecimento global em até 3%.

Na Turquia, Atmaca e Atmaca (2015) avaliaram, através da ACV, a demanda de energia primária e as emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida de 50 anos de dois edifícios residenciais. A fase de operação representou de 59 a 74% das emissões de CO₂ geradas no ciclo de vida.

No Brasil, Costa (2012) analisou o ciclo de vida das emissões de CO₂ de uma edificação residencial de baixa renda durante 50 anos. As

emissões incorporadas representam 40% das emissões totais geradas no ciclo de vida.

A avaliação no ciclo de vida das categorias de impacto das emissões de CO₂ e da demanda de energia são muitas vezes avaliadas simultaneamente, apresentando resultados semelhantes. Tavares et al. (2014) avaliaram a energia embutida e as emissões iniciais de sete diferentes sistemas de coberturas em edificações. A cobertura em estrutura de madeira, cobertura cerâmica e forro de madeira, obteve o melhor desempenho na energia embutida assim como nas emissões de CO₂.

A avaliação das emissões de CO₂ no ciclo de vida das edificações é um método útil para analisar os impactos ambientais gerados nas diferentes etapas de vida dos edifícios.

2.5. ANÁLISE DE CUSTO DO CICLO DE VIDA EM EDIFICAÇÕES

Normalmente, quando se opta por adquirir um produto assim como uma edificação, comparada a outro produto ou edifício, o fator primordial de decisão é o preço. Desta forma, os custos relativos à manutenção do produto assim como de uso do mesmo, na maioria das vezes, são ignorados. Porém, estes custos são tanto ou mais importantes quanto o custo que corresponde ao preço inicial. De fato, a análise atenta destes custos pode vir a ser determinante no processo de escolha. A Análise de Custo do Ciclo de Vida (ACCV) nasceu com o objetivo de avaliar os custos financeiros durante toda a vida de um produto. O uso da ACCV é ainda mais justificado quando se está diante da aquisição de um bem sujeito a manutenções periódicas ou consumos energéticos elevados ao longo de todo o período de utilização. O caso mais sintomático é a compra de um eletrodoméstico. Muitas vezes um produto mais barato poderá se tornar uma opção bem mais cara ao longo da sua vida útil, devido ao consumo energético para o seu uso.

As etapas fundamentais para o desenvolvimento de uma pesquisa sobre Análise de Custo do Ciclo de Vida podem ser sintetizadas em três fases:

- definição do projeto e objetivo a ser analisado;
- classificação dos custos, com elaboração de uma lista com todos os custos e benefícios associados ao produto;
- estimativa dos custos e período de estudo.

Os custos incluídos na lista devem refletir todos os fluxos de caixa desde a primeira despesa até o fim da vida útil do produto. As

etapas de custo de um produto podem ser divididas em: custo inicial para compra do produto e sua instalação, custo de manutenção e energia consumida para o seu uso e custo de eliminação (remoção e disposição). A elaboração da estimativa dos custos é uma tarefa fundamental que deve levar em conta diversos fatores tais como, inflação anual, juros em caso de empréstimo para a compra do produto, assim como aumento do preço da energia com o passar dos anos (DALE, 2007). Esta etapa da ACCV é fundamental para obtenção dos resultados finais da pesquisa. Uma forma de analisar os custos em um período longo, tal qual é a vida de uma edificação, é a criação de diferentes cenários. Em um trabalho desenvolvido na Dinamarca, Marszal et al. (2012) avaliaram através da Análise de Custo do Ciclo de Vida o uso de fontes renováveis em um edifício residencial multifamiliar a energia zero por um período de 50 anos. Para desenvolver a pesquisa os autores criaram três diferentes cenários dependendo do custo da energia ao longo do tempo: baixo, médio e alto. Dessa forma foi possível obter resultados com diferentes cenários que poderão vir a acontecer futuramente.

Os Estados Unidos foram os primeiros a desenvolver métodos para o uso da Análise de Custo do Ciclo de Vida em produtos industriais. Em 1972, no setor da saúde dos Estados Unidos, foi realizada uma das primeiras pesquisas sobre ACCV. O hospital analisado mostrou que os custos operacionais após cinco anos de atividades excederam os custos iniciais de construção e projeto, demonstrando a necessidade destes custos serem levados em consideração na análise inicial da viabilidade do projeto (BROWN; YANUCH, 1985). Em 1980, ainda nos Estados Unidos, foi criado um guia (*Life-Cycle Costing Manual*) pelo *Federal Energy Management Program* (FEMP) com o objetivo de promover a divulgação e a aplicação do estudo do custo do ciclo de vida dos projetos de conservação de energia nos edifícios federais (FULLER; PETERSEN, 1995).

Nas últimas décadas várias foram as pesquisas que usaram a ACCV para analisar a melhor escolha construtiva nas edificações (BANSAL; SINGH; SAWHNEY, 2014; ISLAM et al., 2015a). Na Nova Zelândia foram avaliados, através da ACCV, três diferentes sistemas construtivos de uma residência unifamiliar durante 100 anos (MITHRARATNE; VALE, 2004). Os três sistemas analisados foram: leve, massa térmica e isolamento térmico. A casa com sistema leve resultou ser a mais econômica em todo o ciclo de vida com 674 US\$/m², enquanto a edificação nos outros dois sistemas obteve resultado parecido, ou seja, 750 US\$/m² (massa térmica) e 771 US\$/m² (isolamento

térmico). Este resultado evidenciou que economicamente a melhor escolha seria uma casa leve. Por outro lado, em termos de conforto e outros benefícios ligados à saúde do usuário, os outros dois sistemas são melhores. Comparando os resultados com a energia embutida dos três sistemas, percebe-se que o sistema leve com o menor custo apresentou a energia embutida menor, enquanto o sistema com isolamento térmico além de ser o mais caro teve também a maior energia embutida. Nesta pesquisa o custo do ciclo de vida mostrou uma relação direta com a energia embutida dos materiais da construção: ao reduzir a energia embutida diminui o custo no ciclo de vida. Por outro lado existe relação inversa entre ciclo de vida energético e custo no ciclo de vida: menor consumo de energia durante o ciclo de vida corresponde a maior custo no ciclo de vida.

Segundo Han, Srebric e Enache-Pommer (2014) os custos maiores em uma edificação são devidos ao consumo da energia durante a fase de uso e o custo inicial para sua construção. Os autores avaliaram um edifício de consultórios médicos localizado em Saginaw, nos Estados Unidos, considerando vida útil de 60 anos. Após 30 anos o custo na fase de operação da edificação supera o custo inicial devido à construção e projeto do edifício. O custo para a manutenção representou uma parcela pequena, inferior a 10%. Este estudo demonstra a importância do uso da ACCV nas fases iniciais de projeto. Através do projeto de um edifício mais eficiente pode-se reduzir significativamente o custo durante a fase de uso da edificação, obtendo custo ao longo do ciclo de vida também menor. Materiais mais eficientes apresentam preços maiores no mercado o que comporta um aumento nos custos no ciclo de vida das edificações.

Bansal, Singh e Sawhney (2014) avaliaram os custos de construção de edifícios residenciais na Índia. O objetivo da pesquisa foi quantificar o custo de construção de 122 edifícios residenciais de interesse social com diferentes materiais de construção. Ao mesmo tempo os autores queriam verificar a existência de relação entre energia embutida e custo de construção. Dependendo da tipologia construtiva, o custo dos edifícios avaliados variou entre 62 US\$/m² e 91 US\$/m². Observou-se que menor custo de construção não corresponde necessariamente a energia embutida menor. Este trabalho evidencia algumas limitações analisando somente o custo inicial dos edifícios e não os custos durante a vida útil. O menor consumo de energia durante a fase operacional, devido ao uso de sistemas construtivos mais adequados

para a região, de fato permite redução na conta de luz possibilitando economia financeira ao longo da vida útil da edificação.

Islam, Jollands e Setuge (2015b) avaliaram uma residência unifamiliar na Austrália por um período de 50 anos através do custo no ciclo de vida. Para estimar os custos futuros durante o ciclo de vida foi adotado índice de inflação de 3% ao ano, equivalente à inflação média dos últimos dez anos no país. O objetivo da pesquisa foi identificar em qual fase do ciclo de vida a edificação apresenta o maior custo. Os resultados obtidos demonstraram que o custo inicial para a construção da edificação representou 61,7% (US\$ 99.330) do custo total. O custo de manutenção também representou uma parcela significativa com 25,9% (US\$ 41.600), enquanto o custo operacional e de desconstrução, com 9,74% (US\$ 15.400) e 2,69% (US\$ 4.312), respectivamente, foram as fases com o menor custo no ciclo de vida. Esta pesquisa mostrou que o custo de manutenção de uma edificação pode representar uma quantia significativa. A correta escolha dos materiais de construção utilizados na edificação na fase projetual, pode reduzir o custo de manutenção assim como o impacto ambiental devido ao material descartado.

A escolha das estratégias de projetos para reduzir o consumo energético também pode ser avaliada através da Análise de Custo do Ciclo de Vida das mesmas. Marszal e Heiselberg (2011) usaram a ACCV para avaliar o uso de três diferentes estratégias de projeto para atender a demanda de energia de um edifício residencial multifamiliar eficiente na Dinamarca. Os sistemas analisados foram: bomba de calor, sistema fotovoltaico e coletores solares. Os resultados finais mostraram que o uso da bomba de calor juntamente com o sistema fotovoltaico foi a solução mais adequada do ponto de vista econômico, no ciclo de vida.

A escolha das estratégias de projeto para melhorar a eficiência energética nas edificações é uma tarefa complexa que, como observado nas pesquisas analisadas, não pode ser limitada ao melhor desempenho delas durante a fase operacional. Além do ciclo de vida energético e das emissões de CO₂ também os custos financeiros durante o ciclo de vida de uma estratégia de projeto devem ser levados em conta para permitir a identificação da estratégia com o menor impacto. Através das três análises ficará mais clara a necessidade de usar ou não a estratégia de projeto avaliada.

2.6. CONFORTO TÉRMICO NAS EDIFICAÇÕES

O aspecto social na avaliação da sustentabilidade nas edificações é considerado o fator mais complexo a ser analisado. Pesquisas recentes identificaram o parâmetro do conforto térmico como indicador social para a avaliação da sustentabilidade em edificações (RISHOLT et al., 2013; TALEGHANI et al., 2013; TRIANA, 2016).

A Norma ASHRAE Standard 90.1 (1999) define o conforto térmico como: “um estado mental que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve as pessoas.” A sensação humana de conforto térmico é bastante subjetiva e depende do efeito conjugado de inúmeros fatores. Dentre os principais estão fatores ambientais, como temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura média radiante (TRM), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do ar e fatores do indivíduo, como a taxa metabólica ou atividade, o grau de isolamento da vestimenta e a aclimatação (RORIZ, 2001). O conforto térmico é caracterizado pela sensação de bem-estar do homem, ocasionada por um ambiente em função da atuação conjunta das variáveis mencionadas. Assim, há uma faixa efetiva de ocorrência de tais elementos, para a qual o homem mantém-se em conforto térmico, ou seja, não está estressado nem por calor nem por frio. É a chamada “zona de conforto térmico”. Nestas condições, ou seja, nesta faixa, o esforço termorregulatório do homem é mínimo e o desempenho em qualquer atividade é otimizado (SEELIG; ZEPKA; FOSTER, 2002). Nas últimas décadas diversos foram os estudos para estabelecer zonas de conforto térmico que indicam condições ótimas e limites de conforto através de valores combinados das variáveis de temperatura e umidade (OLGYAY, 1998; GIVONI, 1992).

Existem várias normas desenvolvidas para conforto térmico que avaliam condições de conforto para ambientes. Entre elas as principais são a ISO 7730 (ISO, 2005) e a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013). A ISO 7730 usa a metodologia do Voto Médio Preditado (Predicted Mean Vote – PMV) e da Porcentagem de Insatisfeitos (Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD) para avaliação de conforto térmico de ambientes considerados em condições de estado estacionário. A presente norma foi elaborada especialmente para ambientes condicionados artificialmente. Diferentemente da ISO 7730 (ISO, 2005), a norma ASHRAE 55 (2013) avalia as condições de conforto para espaços condicionados e para ambientes com uso de ventilação natural. A norma se baseia no modelo do método adaptativo de De Dear e Brager (1998), no qual as

temperaturas operativas internas aceitáveis estão relacionadas à média das temperaturas externas. A norma estabelece que os ambientes naturalmente ventilados devem ser avaliados por meio de faixas para condições de conforto com 80% e 90% de aceitabilidade. Para isso, devem ser considerados não menos do que os sete últimos dias ou no máximo 30 dias, por meio da média aritmética da temperatura externa. As duas normas citadas têm como objetivo a aplicação em edificações não residenciais. Mesmo assim diversas são as pesquisas recentes que aplicaram as duas normas na avaliação do conforto térmico em edificações residenciais (TRIANA, 2016; INVIDIATA; GHISI, 2016a; TALEGHANI et al., 2013).

No Brasil, Triana (2016) avaliou o conforto térmico de cinco diferentes projetos de edificações de interesse social através do método adaptativo proposto pela ASHRAE 55, de 2013, que considera a temperatura operativa do ambiente com relação à temperatura externa predominante. Taleghani et al. (2013) avaliaram, através do método do conforto adaptativo, diversas edificações residenciais na Holanda com o objetivo de identificar o efeito da geometria da edificação no comportamento térmico. Na China, na região do Tebet, foi utilizada a metodologia do Voto Médio Predito (PMV) para avaliar e propor soluções de projeto em edificações residenciais (YU et al., 2017). Também na pesquisa de Albatayneh et al. (2016), o método do conforto adaptativo foi utilizado para identificar o melhor tipo de parede externa em edificações residenciais na Austrália. Griego et al. (2012) avaliaram o desempenho energético de edifícios residenciais no México relacionado com o conforto térmico. Para fazer isso, os autores utilizaram o modelo de Fanger para estimar o Voto Médio Predito (PMV). O objetivo principal era propor soluções passivas de projeto para melhorar o conforto térmico dos usuários e reduzir o consumo de energia nas edificações. Os resultados revelaram que através do isolamento térmico da envoltória é possível aprimorar o conforto dos usuários.

A avaliação do conforto térmico é um indicador fundamental não somente para proporcionar melhor conforto ao usuário mas também para reduzir o consumo de energia devido ao condicionamento da edificação (TRIANA, 2016; TALEGHANI et al., 2013; BRAGANÇA et al., 2010). Melhor conforto do usuário equivale a menor consumo de energia, reduzindo os impactos ambientais da edificação na fase de uso.

Para obter edificações mais sustentáveis é fundamental avaliar as mesmas nos três pilares do desenvolvimento sustentável. O conforto

térmico pode ser o parâmetro adequado para avaliar o aspecto social em um método de avaliação sustentável.

2.7. MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Os métodos apresentados até agora mostram que para obter uma análise completa da sustentabilidade devem ser usadas metodologias diferentes que abrangem os aspectos ambientais, sociais e econômicos. Portanto, a avaliação de um produto através dos critérios da sustentabilidade é tarefa complexa, não somente na escolha dos parâmetros mais adequados nos três âmbitos da sustentabilidade, mas também na análise final dos resultados. Através da análise final é possível a tomada das decisões que representam o aspecto final de uma pesquisa. Os aspectos ligados aos conceitos de desenvolvimento sustentável têm natureza multidisciplinar que envolve julgamentos de valores socioeconômicos, ambientais e políticos (difícil de medir somente quantitativamente). O método multicritério de apoio à decisão (MMAD) é uma análise multidimensional quantitativa e qualitativa para tomada de decisões através do auxílio de especialistas para avaliação dos critérios de análise (TRANTAPHYLLOU, 2000). A análise multicritério surgiu enquanto crítica ao modelo racional da Teoria da Decisão, fundamentada na concepção de um único responsável pela decisão, único critério. As análises multicritério são técnicas de análise para tomada de decisão e planejamento que se baseiam no princípio de que, para a tomada de decisão, a experiência e o conhecimento das pessoas é pelo menos tão valioso quanto os dados utilizados. Existem três etapas nos métodos multicritério de apoio à decisão (TRANTAPHYLLOU, 2000):

1. Determinar os critérios e alternativas relevantes;
2. Determinar valores numéricos para cada critério com base na importância relativa de cada um;
3. Processar os valores numéricos para determinar uma classificação de cada alternativa.

O MMAD pode considerar critérios qualitativos e quantitativos. Embora os critérios baseados em variáveis quantitativas sejam independentes dos especialistas, os critérios qualitativos (variáveis) são dependentes do especialista e podem ser subjetivos. Assim, na tomada de decisão, as variáveis qualitativas (critérios) são transformadas em variáveis quantitativas usando indicadores e unidades dos especialistas. Existem diferentes métodos baseados no MMAD (MULLINER, 2016).

É possível agrupar os métodos de definição de pesos em quatro categorias: métodos baseados em ordenação de critérios (STILLWELL et al., 1981), em escalas de pontos (OSGOOD et al., 1957), em distribuição de pontos (EASTON, 1973) e comparação de critérios equivalentes (SAATY, 2008). Diversos MMAD têm sido aplicados em estudos de habitações e sustentabilidade. O método AHP tem sido usado para auxiliar a seleção de edificações para compradores (BALL; SRINIVASAN, 1994), analisar as preferências ambientais dos proprietários de casas (BENDER et al., 2000) e avaliar a qualidade de vida urbana (LOTFI; SOLAIMANI, 2009). Johnson (2002) aplicou diferentes tipos de métodos multicritério de apoio à decisão, incluindo AHP e PROMETHEE, para auxiliar os moradores na escolha de suas habitações. O WSM, WPM, AHP, TOPSIS e COPRAS (*Complex Proportional Assessment*) também são utilizados como auxílio nos processos de manutenção de edifícios (VILUTIENE; ZAVADSKAS, 2003).

O método AHP – *Analytic Hierarchy Process* – foi desenvolvido por Saaty (2008) na década de 70, cujas características são especialmente direcionadas à superação das limitações cognitivas das decisões. O método analítico hierárquico (AHP) de Saaty (2008) é uma ferramenta flexível e poderosa de tomada de decisão que auxilia na definição de prioridades e na escolha da melhor alternativa, quando os aspectos quantitativos e qualitativos devem ser considerados. Permite decompor uma situação complexa e não estruturada nos seus componentes. Através deste método pode-se classificar variáveis segundo uma ordem hierárquica, atribuindo valores numéricos aos julgamentos subjetivos. Dessa forma é possível identificar a variável que têm maior prioridade sobre as outras, facilitando a tomada de decisão.

O julgamento dos diferentes fatores da pesquisa é realizado, geralmente, a partir de um grupo de pessoas que possuem competências específicas na área de pesquisa. Os fatores são avaliados na forma de comparação sempre entre dois elementos de cada estrato em relação a um objetivo do nível superior da hierarquia ou, dado um critério e duas alternativas A e B, analisa-se qual a alternativa que mais satisfaz e quanto mais em relação ao critério considerado. Para a avaliação se utiliza uma escala de referência de 1 a 9 (Quadro 1), onde 1 – igual importância; 3 – pequena importância da primeira sobre a segunda; 5 – importância grande; 7 – importância muito grande e 9 – importância absoluta (2, 4, 6 e 8 são valores intermediários).

Quadro 1. Escala de comparação de critérios.

Valor	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem de forma idêntica para o objeto
3	Pouco mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é um pouco mais importante que o outro
5	Muito mais importante	A análise e a experiência mostram que um critério é claramente mais importante que o outro
7	Bastante mais importante	A análise e a experiência mostram que um dos critérios é predominante para o objetivo
9	Extremamente mais importante	Sem qualquer dúvida um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo
2,4,6,8	Valores intermediários	Também podem ser utilizados

Fonte: adaptado Saaty, 2008.

Os resultados obtidos, através da comparação paritária são colocados em uma matriz A quadrada $n \times n$. A partir dos resultados inseridos na matriz, que mostram a comparação, visualizam-se os autovetores e autovalores. O autovetor dá a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento. A relação entre o índice de consistência (IC) e o índice aleatório ou randômico (IR) é chamada de razão de consistência (CR), que deve ser menor que 0,10. Esta razão permite avaliar o grau de violação da proporcionalidade e transitividade dos julgamentos das pessoas que possuem competências específicas na área de pesquisa.

O método hierárquico de Saaty (2008) tem sido aplicado também em pesquisas recentes para avaliar os impactos ambientais, sociais e econômicos das edificações. Motuziene et al. (2016) avaliaram, através dos métodos AHP e COPRAS, três soluções de envelope de uma edificação unifamiliar na Lituânia. O objetivo da pesquisa era identificar a melhor solução de envelope considerando quatro parâmetros: demanda de energia primária, aquecimento global, destruição da camada de ozônio e custos no ciclo de vida. Um questionário para determinar o peso dos quatro parâmetros foi submetido a 30 profissionais na área de edificações e impactos ambientais. O peso maior foi dado aos custos. Através da análise multicritério, o envelope de madeira resultou ser a

melhor solução de projeto da edificação unifamiliar. Banani et al. (2016) analisaram, através do métodos AHP, nove diferentes indicadores (eficiência no consumo de água, eficiência energética, qualidade do ar interior, seleção de materiais, gestão eficaz, terra e resíduos, custo financeiro no ciclo de vida, qualidade do serviço e aspectos culturais) para identificar qual deles apresenta maior importância para a projeção de edifícios não residenciais na Arábia Saudita. Um questionário para determinar o peso dos diferentes indicadores foi submetido a 18 especialistas em matéria de edifícios sustentáveis. O consumo de água e a eficiência energética foram os indicadores com maior peso na tomada de decisões finais. Os aspectos econômicos também apresentaram importância significativa para as escolhas projetuais. Os resultados das duas pesquisas mostraram que esta metodologia é fortemente subjetiva e depende de muitos fatores ligados ao contexto local e as suas condições climáticas, políticas e econômicas (CHANDRATILAKE; DIAS, 2013). Outro fator relevante, quando se usa esta metodologia, é a escolha e o número de especialistas que responde ao questionário. O número de entrevistados varia de pesquisa para pesquisa (MOTUZIENENE et al., 2016; BANANI et al., 2016; SHOJAEI et al., 2014) mas é evidente que quanto maior for a quantidade de entrevistados mais precisa será a pesquisa. Além disso, é importante que os entrevistados trabalhem em setores variados e/ou vivenciem experiências cotidianas que permitam que os resultados sejam mais completos e realistas (SHOJAEI et al., 2014).

2.8. EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS EDIFICAÇÕES

A avaliação do desempenho das edificações não pode deixar de considerar também os efeitos das mudanças climáticas, afim de se obter uma análise mais completa e realista. As últimas décadas viram uma crescente preocupação com as mudanças climáticas e o aquecimento global como uma ameaça potencial para o ecossistema e para os seres humanos. O ano de 2015 foi o mais quente da história (MET OFFICE, 2016). A temperatura global média do planeta, em 2015, foi de 0,75°C acima da temperatura média do período de 1961-1990 (MET OFFICE, 2016). Além disso, o quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) mostrou uma crescente concentração na atmosfera de gases de efeito estufa (GEEs) e, conseqüentemente, o aquecimento global do planeta no século passado (IPCC, 2014). As emissões de gases como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, etc.

são a principal causa do aumento da temperatura global. As últimas três décadas foram as mais quentes desde 1850. Se as emissões continuarem, como as tendências atuais, a temperatura média do ar durante o período de 2081 a 2100 será de 4,8°C superior à de 1986-2005 (IPCC, 2014).

Para analisar as possíveis implicações das mudanças climáticas no futuro, o IPCC lançou - em 2000 - um conjunto de seis "cenários de emissões" que podem ser usados na criação de modelos climáticos para determinar as potenciais mudanças no clima futuro (NAKICENOVIC; SWART, 2000). As emissões quantificadas nesses cenários baseiam-se em diferentes modelos para o desenvolvimento futuro da sociedade e incluem fatores demográficos, econômicos, sociais e tecnológicos. Existem quatro famílias de cenários distintos: A1, A2, B1 e B2. O cenário A1 é dividido em três grupos que representam diferentes desenvolvimentos nas tecnologias energéticas: A1FI que considera um uso intensivo de combustível fóssil, A1B que considera o uso de fontes de energia fóssil e renováveis e A1T onde há predominantemente o uso de fonte de energia renováveis (IPCC, 2014).

Os efeitos das mudanças climáticas afetam diretamente o consumo de energia e o comportamento térmico dos edifícios (NAKICENOVIC; SWART, 2000; OLONSHECK et al., 2011). Nas últimas décadas vários estudos foram desenvolvidos para analisar o impacto das mudanças climáticas nas edificações (AMATO et al., 2005; FRANK, 2005; GUAN, 2009; WANG et al., 2010; BERGER et al., 2014; INVIDIATA; GHISI, 2016b). Na Suíça, Frank (2005) investigou o impacto potencial das mudanças climáticas no consumo de energia de aquecimento e resfriamento em edifícios residenciais e de escritórios. Foram considerados quatro cenários climáticos para o período 2050-2100. Em Zurique, o consumo de energia para resfriamento aumentará 223% e 1050%, respectivamente, em 2050 e 2100, enquanto a demanda de energia para aquecimento diminuirá 36% e 58%, em 2050 e 2100, respectivamente. Foram propostas medidas de mitigação, tais como sombreamento solar e estratégias de ventilação noturna. Na Suécia, Doodoo et al. (2014) investigaram o efeito do aquecimento global sobre o desempenho energético de edificações residenciais multifamiliares. Foram analisados dois edifícios diferentes: um edifício residencial convencional e um edifício passivo. O consumo de energia para o aquecimento do edifício residencial convencional, em comparação com o consumo atual, diminuirá 13% e 16%, em 2050 e 2100, respectivamente, enquanto o consumo de energia para resfriamento aumentará 33% e 42%, em 2050 e 2100, respectivamente. Por outro lado,

em comparação com o consumo atual, na edificação passiva, o consumo de energia para aquecimento diminuirá 17% e 22%, em 2050 e 2100, respectivamente, enquanto o consumo de energia para resfriamento aumentará 39% e 49%, em 2050 e 2100, respectivamente. Esses resultados mostram que os edifícios passivos são predominantemente projetados para reduzir o consumo de energia para aquecimento.

Para reduzir o impacto da mudança climática nos edifícios, alguns estudos mostraram que o uso de estratégias de projeto podem ser fundamentais para reduzir a demanda de energia em edifícios (HOFF et al., 2015; TRIANA, 2016; INVIDIATA; GHISI, 2016b; HUANG; HWANG, 2016). Na Holanda, Hooff et al. (2015) analisaram seis soluções passivas em uma casa geminada. A aplicação de tais medidas pode reduzir a demanda de energia de resfriamento entre 59 e 74%. Em Taiwan, Huang e Hwang (2016) investigaram o potencial de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas através do uso de cinco estratégias passivas em uma edificação residencial. Os autores afirmam que o uso combinado das estratégias de projeto pode reduzir o consumo de energia de resfriamento. Nik et al. (2016) avaliaram o potencial de economia de energia através de nove medidas de projeto avaliadas individualmente e combinadas, para diferentes edifícios residenciais na Suécia. O uso combinado de melhor isolamento térmico do envelope da construção, de janelas eficientes e ajuste da temperatura de *set-point* para 20°C, mostrou-se a solução mais eficaz, com economia de energia de aproximadamente 30%. No Brasil, Triana (2016) evidenciou como medidas de adaptação aplicadas a edificações de interesse social são fundamentais para melhorar o desempenho termoenergético da edificação e o conforto do usuário, considerando as mudanças climáticas. Invidiata e Ghisi (2016b) evidenciaram que, para minimizar os efeitos das mudanças climáticas, o uso de estratégias passivas é fundamental e pode reduzir em até 50% a demanda anual de energia de resfriamento e aquecimento em edificações residenciais.

2.9. SOLUÇÕES DE PROJETO PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

A Avaliação do Ciclo de Vida nas edificações é um método que abrange toda a vida útil de um edifício. Esta forma de analisar as edificações é recente e ainda em fase de estudo. Por outro lado, o conceito de eficiência energética em edificações vem se desenvolvendo

há várias décadas, tendo como foco a redução dos consumos energéticos na fase de operação de um edifício.

Em todo o mundo, o uso das edificações representa a principal fonte de consumo de energia elétrica (IEA, 2016). Nos Estados Unidos, país com maior consumo de energia no globo terrestre, por exemplo, as edificações consomem 74,9% de energia elétrica; este consumo é devido, principalmente, ao uso de sistemas de ar-condicionado (IEA, 2016). No México, país em desenvolvimento como o Brasil, se estima que a quantidade de edifícios residenciais dobrará até 2030, provocando crescimento do consumo de energia causado pelas edificações (GRIEGO et al., 2012).

No Brasil, o uso das edificações representa a principal causa de consumo de energia elétrica. Em 2015, 50,8% da energia produzida foi consumida por edificações, sendo 25,1% em edifícios residenciais, 17,5% em edifícios comerciais e 8,2% por edifícios públicos (BRASIL, 2016). O consumo de energia elétrica nas edificações se diferencia de acordo com o tipo de edifício. Assim, o uso de geladeira e freezer nos edifícios residenciais representa a maior parcela do consumo de energia elétrica seguido pelo uso de sistema de ar-condicionado e do chuveiro elétrico (GHISI et al., 2007). Nas edificações comerciais brasileiras a maior parcela do consumo de energia elétrica é devida ao uso do sistema de ar-condicionado (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014). As condições climáticas podem influenciar o consumo final de energia das edificações. Na Itália, a situação não é muito diferente. Em 2014, 37,1% da energia produzida foi consumida por edificações residenciais, sendo 75% devido ao aquecimento e resfriamento dos ambientes (ENEA, 2017).

Pesquisas sobre eficiência energética, assim como os regulamentos de certificação energética, visam reduzir o consumo de energia nas edificações (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014; INVIDIATA; ORDENES, 2013; BRASIL, 2012). Através de medidas de eficiência energética pode-se reduzir em até 50% o consumo de energia em edificações (GRIEGO et al., 2012). Por isso, nos últimos anos, a maneira de se projetar os edifícios mudou, tendo particular atenção nos aspectos ligados à eficiência energética. Elementos de arquitetura bioclimática, equipamentos mais eficientes, assim como uso de fontes de energias renováveis começaram a fazer parte da linguagem projetual de arquitetos e engenheiros (TRIFUNOVIC et al., 2009; YUN, CHOI; KIM, 2014; BLADH; KRANTZ, 2008; AMAN et al., 2013; RUPP; GHISI, 2013). Quando os projetistas trabalham integrando energia, luz natural e conforto, relacionados ao processo de projeto, o

equilíbrio dessas variáveis pode gerar melhor eficiência energética, reduzindo o consumo de energia (MARSH; LAURING, 2011). Conforme o Procel Edifica, estima-se um potencial de redução do consumo de energia de aproximadamente 30% com a implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, ar-condicionado e intervenções arquitetônicas na envoltória de edificações existentes. Esta porcentagem se eleva para 50% em edificações novas (BRASIL; ELETROBRÁS; PROCEL, 2007). Além disso, o correto uso de estratégias passivas e ativas garantem melhor conforto para o usuário (JABER; AJIB, 2011; KIM et al., 2012)

Gratia e De Herde (2003) afirmaram que as decisões tomadas no estágio inicial de projeto podem ter grande impacto no desempenho energético final do edifício. Variáveis como a profundidade e a altura dos ambientes e o tamanho das aberturas, quando resolvidas de maneira equivocada, podem aumentar o consumo de energia da edificação, pois reduzem o ganho de luz natural e aumentam as temperaturas de verão para níveis que causam desconforto ao usuário.

Lima e Pedrini (2008) realizaram uma pesquisa onde o objetivo principal foi identificar as decisões projetuais mais importantes relacionadas à redução do consumo energético. A pesquisa foi realizada por meio de simulação computacional, considerando variáveis de projeto como orientação, sombreamento, dados de cobertura, paredes, fração de abertura na parede e tipo de vidro. Observaram que o consumo de energia pode ser reduzido em até 30%.

Como observado neste capítulo, a energia consumida na fase operacional é a primeira causa do consumo energético nas edificações. Por isso, os pesquisadores focaram seus trabalhos na busca por minimizar este consumo, melhorando o desempenho energético das edificações por meio do uso de estratégias de eficiência energética. Os resultados apresentados por diferentes autores mostram que as estratégias de projeto realmente permitem reduzir o consumo de energia durante a fase operacional (INVIDIATA; ORDENES, 2013; BELLIA; DE FALCO; MINICHIELLO, 2013). A atenta escolha das estratégias nas fases iniciais de projeto permite definir a solução mais adequada e eficiente para a edificação. O estudo das condições climáticas do lugar assim como a orientação e o uso da edificação, são elementos necessários para que as estratégias de projeto estejam empregadas da forma mais adequada, aperfeiçoando ainda mais o desempenho energético dos edifícios.

Entretanto, a correta escolha das estratégias de projeto não pode ser limitada ao seu desempenho durante a fase operacional, mas deve abranger o ciclo de vida energético da edificação, permitindo, desta maneira, analisar o comportamento da estratégia de forma mais adequada.

2.10. CONCLUSÃO DA REVISÃO

A revisão bibliográfica abordou os principais temas necessários para obter uma visão mais clara no desenvolvimento desta tese.

As pesquisas internacionais que tratam da eficiência energética visam principalmente reduzir o consumo de energia durante a fase operacional de uma edificação. O uso das corretas práticas de eficiência energética pode reduzir em até 50% o consumo de energia dos edifícios. Portanto, a adequada escolha das estratégias de projeto voltadas a minimizar o consumo de energia nos edifícios, como mostrado anteriormente, é fundamental não somente para reduzir o consumo de energia, mas também para garantir o melhor conforto térmico do usuário. No entanto, a maioria das pesquisas que avaliam a eficiência energética das estratégias de projeto se limitam a analisar o desempenho das estratégias e do edifício somente durante a fase operacional. Desta forma, a análise da eficiência energética das estratégias de projeto resulta ser incompleta, limitando a avaliação somente na fase operacional. Além disso, a seleção das estratégias de projeto baseada em um único indicador pode não ser a forma mais adequada para determinar a melhor escolha em termos de sustentabilidade.

A revisão bibliográfica mostrou que o tema da eficiência energética em edificações não pode se limitar à análise do consumo durante a fase de operação, mas deve abranger os três pilares da sustentabilidade. Através da ACVE e da ACVCO₂ os edifícios podem ser analisados durante a vida útil, obtendo-se os impactos ambientais causados pelas emissões de CO₂ e pelo consumo de energia. Dessa forma, também as estratégias de projeto que visam reduzir o consumo de energia das edificações poderão ser avaliadas não somente pelo desempenho delas durante a fase operacional, mas também durante o ciclo de vida. Outro aspecto fundamental quando se trata o tema da sustentabilidade nas edificações é o fator social. Através da análise do parâmetro do conforto térmico do usuário nas edificações é possível avaliar a qualidade de vida das pessoas, com o objetivo de proporcionar melhor conforto e menor consumo energético. O aspecto econômico

permite analisar a viabilidade econômica das escolhas projetuais. As pesquisas analisadas mostraram que a Análise de Custo do Ciclo de Vida é uma importante ferramenta nas escolhas projetuais, evidenciando que não existe uma relação entre desempenho energético e custos dos materiais da construção civil. A avaliação das edificações através dos critérios da sustentabilidade é uma metodologia complexa que pode dificultar a tomada de decisão final. Os conceitos de desenvolvimento sustentável têm natureza multidisciplinar que envolve julgamentos de valores socioeconômicos, ambientais e políticos. Para facilitar a análise dos resultados e promover a escolha final, o método multicritério de apoio à decisão (MMAD) pode ser uma ferramenta essencial na avaliação final. Além disso, os efeitos das mudanças climáticas nas edificações serão um elemento relevante no futuro desempenho termoenergético dos edifícios. Quando se quer avaliar as edificações nos três pilares da sustentabilidade é necessário considerar também as futuras condições climáticas como variável essencial em uma análise de desempenho futuro.

Portanto, neste estudo pretende-se, por meio da avaliação das edificações nos três parâmetros de sustentabilidade, criar um método que possibilite a correta escolha das estratégias de projeto voltadas à obtenção de edifícios mais sustentáveis. As estratégias de projeto poderão assim ser analisadas e comparadas entre si, verificando e avaliando os aspectos ambientais, sociais e econômicos ao longo da vida útil da edificação. Os efeitos das mudanças climáticas na vida útil das edificações serão parte integrante do método proposto.

A análise das pesquisas internacionais e nacionais sobre as principais temáticas apresentadas mostrou que o trabalho proposto nesta tese é atual e inovador. Até hoje, a maioria das pesquisas que avaliam estratégias de projeto em edificações se limitam a analisar as mesmas por meio de uma das metodologias aqui apresentadas. Esta tese tem como objetivo a proposição de um método para a escolha de estratégias de projeto nas edificações, que não seja focado unicamente na avaliação do seu desempenho na fase de uso, mas também no ciclo de vida. Dessa forma, o projetista poderá escolher as estratégias de projeto considerando o desempenho energético, as emissões de dióxido de carbono, o conforto térmico dos usuários e fatores econômicos no ciclo de vida, obtendo edifícios mais sustentáveis.

3. MÉTODO

O método consiste em avaliar o desempenho das estratégias de projeto, durante suas vidas úteis, aplicando o conceito de sustentabilidade nas edificações.

O método poderá ser aplicado em edificações residenciais e comerciais, em etapa de projeto ou já construídas, em diferentes cenários. Nesta pesquisa, para a aplicação do método, foram avaliados dois edifícios: um residencial unifamiliar de interesse social localizado em três cidades brasileiras e um edifício residencial multifamiliar de interesse social localizado na cidade de Milão, na Itália. Os modelos detalhados das edificações assim como das estratégias de projeto avaliadas são apresentadas nos Capítulos 4 e 5.

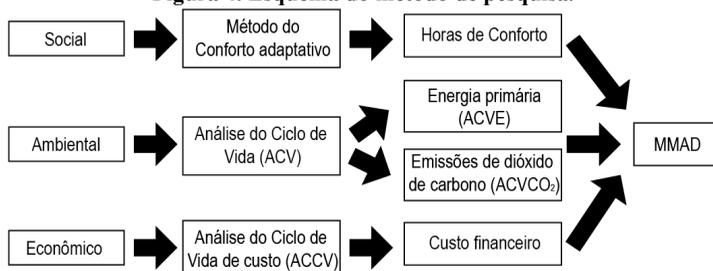
Para o desenvolvimento do método proposto foram utilizadas, como referência, as normas da série *International Organization for Standardization* (ISO), editadas no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e na Itália pelo *Ente Italiano di Normazione* (UNI).

As estratégias de projeto nas edificações foram avaliadas através de quatro diferentes parâmetros (Figura 4):

- Parâmetro de conforto, obtido através do método do conforto adaptativo;
- Parâmetro energético, obtido através da ACVE;
- Parâmetro das emissões, obtido através da ACVCO₂;
- Parâmetro de custo, obtido através da ACCV.

Através do Método Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD) foi possível definir a estratégia de projeto mais adequada conforme a prioridade dos quatro parâmetros estabelecida por meio da aplicação de um questionário a especialistas (Apêndice A).

Figura 4. Esquema do método de pesquisa.



A definição das diferentes fases do ciclo de vida de uma edificação foi o ponto de partida para o desenvolvimento do trabalho. O ciclo de vida de uma edificação e dos seus componentes se divide em três fases principais: inicial (embutida), operacional (uso e manutenção) e fim de vida (demolição, reuso/reciclagem). Entre os quatro parâmetros utilizados para analisar as estratégias de projeto somente o parâmetro de conforto não considerou o ciclo de vida na sua análise mas exclusivamente a fase operacional.

Como citado anteriormente, o foco da pesquisa foi a avaliação das estratégias de projeto no ciclo de vida das edificações. Por isso, o desenvolvimento do método proposto foi dividido em duas etapas principais (Figura 5):

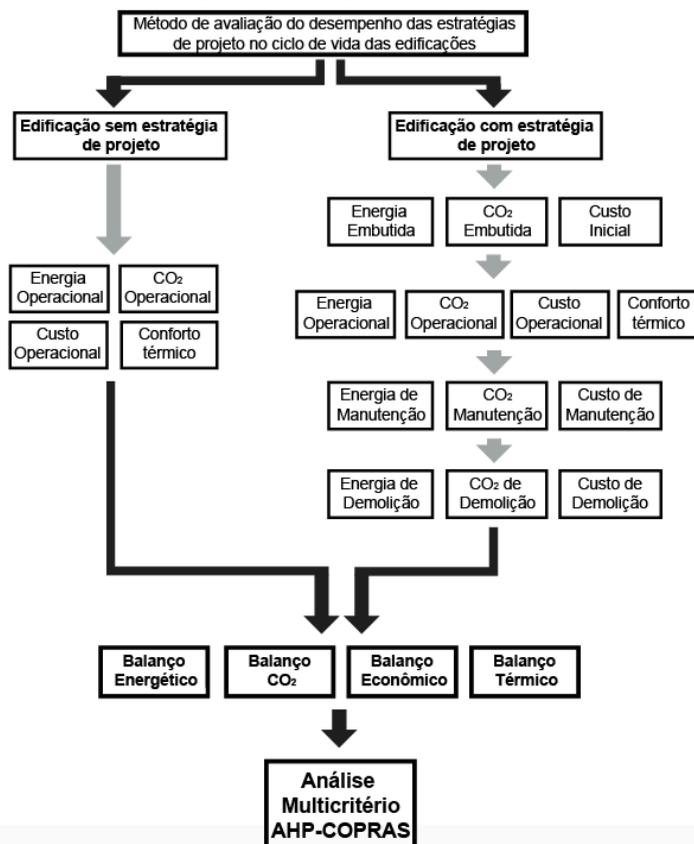
- Avaliação da edificação sem as estratégias de projeto;
- Avaliação da edificação com as estratégias de projeto.

O ponto de partida foi a criação do modelo geométrico da edificação objeto de estudo. Através do programa *Open Studio* foi construído o modelo geométrico do edifício, utilizado nas duas etapas.

Na primeira etapa o desempenho termoenergético do edifício foi avaliado no seu caso base, ou seja sem as estratégias de projeto, exclusivamente na fase operacional durante a sua vida útil, por meio do programa computacional *EnergyPlus* 8.4, a mais recente versão quando foram iniciadas as simulações dos estudos de caso. Foi avaliado exclusivamente o consumo de energia devido ao aquecimento e resfriamento da edificação. Nesta primeira fase foram obtidos como resultados finais o consumo de energia na vida útil do edifício e as horas de conforto anuais. Os parâmetros energéticos, de custo e de emissões no ciclo de vida não foram avaliados.

Na segunda etapa foram aplicadas as estratégias de projeto na edificação. Nesta fase, através da análise do ciclo de vida energético, de emissões e de custo, foi possível avaliar o ciclo de vida exclusivamente da estratégia de projeto empregada, enquanto a edificação foi novamente avaliada na fase operacional. Para a análise da fase inicial (embutida), de manutenção e de fim de vida, foram utilizados valores de base de dados nacionais e interacionais aplicadas nas diferentes estratégias de projeto avaliadas nos estudos de casos sem o auxílio de programas computacionais. Os dados relativos às características dos materiais das estratégias de projeto foram obtidos através de levantamento na literatura nacional e internacional, nas normas brasileiras e italianas e nos catálogos dos fabricantes.

Figura 5 – Fluxograma do método.



Na fase inicial foram considerados os consumos de energia, as emissões de CO₂ e os custos para a fabricação da estratégia, para o seu transportes e o eventual desperdício da aplicação de material na obra. Na fase operacional foi avaliado o consumo energético, as emissões geradas e o valor pago pela energia consumida na edificação, com a aplicação das estratégias de projeto. Nesta fase foi avaliado exclusivamente o consumo de energia devido ao aquecimento e resfriamento da edificação. As horas de conforto foram recalculadas em função da aplicação da estratégia na edificação. A energia operacional e as horas de conforto da

edificação foram obtidas por meio do programa computacional *EnergyPlus* versão 8.4. A fase de manutenção analisou a energia consumida, as emissões geradas e os custos devido à manutenção e a eventual substituição das estratégias de projeto durante a vida útil da edificação. Enfim, a fase de fim de vida avaliou as atividades de demolição e transporte dos resíduos dos componentes presentes nas diferentes estratégias de projeto nos parâmetros energético, de emissões e de custo. A fase de reuso foi avaliada unicamente a título informativo e somente para os parâmetros energético e de emissões de CO₂.

Através da avaliação da edificação antes e depois da aplicação da estratégia de projeto foi possível verificar se a utilização desta permite obter melhor desempenho do ponto de vista energético, das emissões, de custos e de conforto do usuário. Assim, se a edificação estudada com a aplicação da estratégia obtiver balanço energético, econômico, de emissões de CO₂ e de conforto positivo então a estratégia será considerada adequada para o edifício avaliado. Para avaliar e identificar quais dos parâmetros apresenta a maior importância assim como para identificar a melhor estratégia de projeto foram utilizados o método AHP - Analytic Hierarchy Process - (SAATY, 2008) e o método COPRAS. Um questionário foi aplicado a trinta profissionais de diferentes áreas na construção civil para a definição das prioridades dos quatro parâmetros da sustentabilidade (Apêndice A).

3.1. ESCOPO DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

O escopo desta pesquisa foi criar um método que permitisse avaliar e identificar as estratégias de projeto mais adequadas durante o ciclo de vida, para obter edificações mais sustentáveis. Para isso foi necessária a utilização de quatro parâmetros através dos quais foi possível analisar o desempenho das estratégias de projeto nas edificações. Nesta seção são apresentadas as características dos três parâmetros que avaliam as estratégias de projeto no ciclo de vida: o parâmetro energético, de emissões de CO₂ e econômico.

3.1.1. Identificação da função

A função do sistema é a redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da edificação através do uso de estratégias projetuais. As estratégias avaliadas devem possuir as características

físicas para a redução do consumo de energia durante a fase operacional de um edifício residencial ou comercial.

3.1.2. Unidade funcional

Para poder comparar o desempenho das diferentes estratégias de projeto voltadas à melhoria da eficiência energética de uma edificação, a unidade funcional teve que ser definida em função do sistema. Nos dois estudos de casos foram definidas as duas unidades funcionais.

No estudo de caso brasileiro a unidade funcional foi definida como uma casa de 38,16 m² de área útil para uma família composta por quatro pessoas.

No estudo de caso italiano a unidade funcional foi definida como uma edificação de oito andares e quatro apartamentos, com um área útil de 199,7 m² por andar.

Para ACVE a unidade de medida foi a energia consumida durante todas as fases do ciclo de vida por unidade de área de uma edificação: kWh/m². A energia embutida e de manutenção dos materiais das diferentes estratégias, que é expressa em MJ, foi transformada em kWh dividindo o valor através do coeficiente de conversão recomendado pela ANEEL (2017) igual a 3,6. Para a avaliação das emissões de CO₂ no ciclo de vida no Brasil foi adotada o kg/CO₂ enquanto que para a avaliação na Itália, kg/CO₂ equivalente. Isso se deve à falta de dados brasileiros expressos em kg/CO₂ equivalente. Como evidenciado pela base de dados ICE (2011) os dados expressos em kg/CO₂ equivalente apresentaram emissões aproximadamente 10% maior em comparação com os dados em kg/CO₂. Para a ACCV as duas unidades monetárias escolhidas foram as duas moedas correntes utilizadas nos respectivos países: R\$ no Brasil e € na Itália.

3.1.3. Vida útil

O tempo ou período de estudo foi definido de acordo com a vida útil da edificação. Também neste caso os dois estudos de caso foram avaliados considerando vidas úteis diferentes.

No estudo de caso brasileiro, de acordo com a NBR 15.575-1 (ABNT, 2013), foi considerada uma vida útil média da estrutura principal igual a 63 anos (Tabela 2).

Tabela 2 – Vida útil de uma edificação no Brasil segundo a norma NBR 15.575-1.

Parte da edificação	Exemplos	VUP (Vida útil de projeto) (anos)		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura Principal	Fundações, elementos estruturais, paredes estruturais, estruturas periféricas etc.	≥ 50	≥ 63	≥ 75

Fonte: adaptado de ABNT (2013).

No estudo de caso italiano foi considerada uma vida útil de 100 anos, pois mais de 50% do patrimônio edilício é anterior a 1919 (ISTAT, 2011).

Como anteriormente exposto, o método aqui apresentado poderá ser utilizado também em edifícios existentes. Neste caso a vida útil dele pode ser calculada de acordo com a Equação 1.

$$V_{\text{útil}} = 63/100 - V_{\text{edifício}} \quad (1)$$

Onde:

$V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação (anos);

$V_{\text{edifício}}$ são os anos de vida da edificação desde a sua construção (anos).

Para estabelecer a vida útil das estratégias de projeto foi necessária uma pesquisa mais aprofundada sobre a durabilidade dos diferentes materiais. Os dois estudos de caso foram avaliados de maneiras diferentes na fase de manutenção. Enquanto no caso brasileiro as estratégias de projeto aplicadas na edificação foram avaliadas em três diferentes cenários a respeito da sua vida útil, no estudo de caso italiano foi avaliado em um único cenário.

No primeiro cenário a vida útil da estratégia foi a mesma da edificação objeto de estudo. Nesta situação a estratégia de projeto não foi substituída durante a fase de manutenção. Este cenário não foi aplicado no estudo de caso italiano.

No segundo cenário foi considerada vida útil das estratégias de projeto de acordo com a norma NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) que

estabelece vida útil diferente para cada componente da edificação. Este segundo cenário não foi aplicado no estudo de caso italiano. A Tabela 3 mostra as principais partes de uma edificação com a vida útil correspondente. Nesta pesquisa foi usada a vida útil intermediária dos diferentes componentes.

Tabela 3 – Vida útil dos componentes construtivos de uma edificação conforme a NBR 15.575-1.

Componente da edificação	Exemplos	VUP (Vida útil de projeto) (anos)		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Vedação externa	Paredes de vedação externa, painéis de fachada etc.	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Vedação Interna	Paredes e divisórias leves internas, escada interna, guarda-corpos.	≥ 20	≥ 25	≥ 30
Cobertura	Estrutura do cobertura, e coletores de água pluvial.	≥ 20	≥ 25	≥ 30
	Telhamento	≥ 13	≥ 17	≥ 20
Pintura	Pintura de fachada, pinturas e revestimentos sintéticos texturizados	≥ 8	≥ 10	≥ 12
Esquadrias externas	Janelas, brises, cobogós etc.	≥ 20	≥ 25	≥ 30

Fonte: adaptado de ABNT (2013).

O terceiro cenário foi baseado nos dados fornecidos pela literatura nacional e internacional em matéria de ACV. Este é o único cenário no qual as estratégias de projeto foram avaliadas no estudo de caso italiano. A Tabela 4 mostra a vida útil de alguns dos principais materiais e componentes construtivos de uma edificação.

Tabela 4 – Vida útil dos materiais e equipamentos de uma edificação.

Material/ Componente	Vida útil (anos)	Fonte
Estrutura de aço	100	Mithraratne e Vale (2004)
Tubos de cobre	50	Mithraratne e Vale (2004)
Isolamento	50	Chen (2001)
Esquadrias, portas e janelas	46	Scheuer (2003);Mithraratne; Vale (2004)
Telha metálica em aço	40	Mithraratne; Vale (2004)
Telha de fibrocimento	40	Tavares (2006)
Telha de concreto	38	Chen (2001)
Piso cerâmico	30	Fay (1999)
Painéis de madeira	30	Mithraratne; Vale (2004)
Piso vinílico	18	Scheuer (2003)
Tubulação água quente	16	Mithraratne e Vale (2004)
Pintura de telhado	10	Chen (2001)
Pinturas	8	Mithraratne e Vale (2004)
Lâmpadas fluorescentes	5	Tavares (2006)
Lâmpadas incandescentes	2	Tavares (2006)

O objetivo da análise de diferentes cenários de manutenção, no estudo de caso brasileiro, foi de identificar com qual tipo de cenário as estratégias teriam o melhor desempenho.

3.1.4. Fronteiras do sistema

Após a definição da vida útil da edificação, o passo seguinte foi definir as etapas do ciclo de vida nas quais foram realizadas as análises. Como explicado, a avaliação das estratégias de projeto compreendeu todas as fases da ACVE, ACVCO₂ e da ACCV a partir da extração das matérias-primas até a disposição final. A edificação em si foi avaliada unicamente na fase operacional considerando o consumo energético para resfriamento e aquecimento e o conforto térmico do usuário na edificação. Assim tanto a análise da fase inicial (embutida) quanto da fase de manutenção e de fim de vida não foram aplicadas na avaliação da edificação inteira.

3.2. CONFORTO ADAPTATIVO

O primeiro parâmetro avaliado na edificação foi o parâmetro do conforto térmico. Através das simulações termoenergéticas da edificação, com e sem as estratégias de projeto, foi possível obter as horas de conforto e de desconforto do usuário na edificação. Nas simulações computacionais foram utilizados o arquivo climático atual e os arquivos climáticos futuros gerados através do programa *Climate Change World Weather file Generator* (CCWorldWeatherGen) para cada cidade (JENTESH et al., 2008; JENTESH et al., 2013).

Através do método de conforto adaptativo (ASHRAE, 2013), foi possível obter as horas de conforto internas. Nesta pesquisa, as horas de conforto foram avaliadas exclusivamente nos ambientes de permanência prolongadas.

Para determinar as horas de conforto e de desconforto por calor e frio foram utilizadas as equações apresentadas pela ASHRAE 55 (2013). A temperatura do limite inferior considerando 80% de aceitabilidade é apresentada na Equação 2. No estudo de caso brasileiro foi utilizada a temperatura fixa de 19,5°C como temperatura do limite inferior (LAMBERTS et al., 2013).

$$I_{\text{lim}} = 0,31 \times t_{\text{me}} + 14,3 \quad (2)$$

Onde:

I_{lim} é a temperatura limite inferior da zona de conforto (°C);

t_{me} é a temperatura média externa (°C).

A temperatura do limite inferior considerando 80% de aceitabilidade é apresentada na Equação 3:

$$S_{\text{lim}} = 0,31 \times t_{\text{me}} + 21,3 \quad (3)$$

Onde:

S_{lim} é a temperatura limite superior da zona de conforto ($^{\circ}\text{C}$);

t_{me} é a temperatura média externa ($^{\circ}\text{C}$).

Através da avaliação das temperaturas internas dos ambientes de permanência prolongada foi possível definir as horas de conforto na edificação ao longo de um ano (Equação 4).

$$HC = \frac{Hc_{a1} + Hc_{a2} + Hc_{a3} \dots Hc_{an}}{(Hc_{a1} + Hc_{a2} + Hc_{a3} \dots Hc_{an})} \quad (4)$$

Onde:

HC são as horas de conforto anuais do usuário na edificação;

Hc_{an} são as horas de conforto anuais nos diferentes ambientes de permanência prolongada.

A Equação 5 apresenta as horas de conforto a mais ou a menos (balanço das horas de conforto) na vida útil da edificação, obtidas através do uso da estratégia de projeto, em comparação com o estudo do caso base.

$$BHC = (HC_C - HC_S) \times V_{\text{útil}} \quad (5)$$

Onde:

BHC é o balanço das horas de conforto na vida útil da edificação obtidas através do uso da estratégia de projeto (h);

HC_C são as horas de conforto médias da edificação em um ano com a estratégia de projeto (h);

HC_S são as horas de conforto médias da edificação em um ano sem a estratégia de projeto (h);

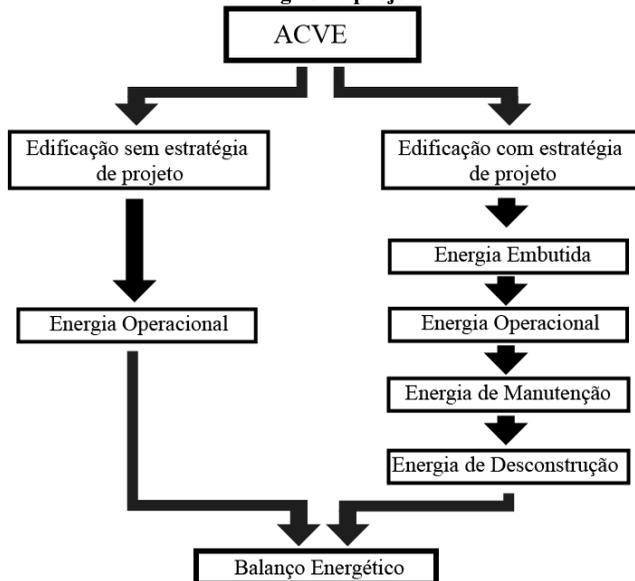
$V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação (anos).

3.3. ACVE DAS ESTRATÉGIAS DE PROJETO

3.3.1. Energia Embutida

A energia embutida é a energia gasta para produção, transporte, montagem e instalação dos materiais que compõem um edifício. Nesta pesquisa, como explicado anteriormente, a energia embutida foi avaliada unicamente para as estratégias de projeto utilizadas na edificação. A Figura 6 mostra o método de avaliação do parâmetro energético nas estratégias de projeto.

Figura 6 – Fluxograma da avaliação do parâmetro energético nas estratégias de projeto.



Para o cálculo da energia embutida final de cada estratégia de projeto foi utilizada a Equação 6.

$$EE = EE_{\text{estratégia}} + EE_{\text{transporte}} + EE_{\text{instalação}} \quad (6)$$

Onde:

- EE é a energia embutida total (kWh);
 EE_{estratégia} é igual a energia embutida da estratégia de projeto pronta para sua instalação (kWh);
 EE_{transporte} é igual a energia consumida para o transporte da estratégia até a edificação (kWh);
 EE_{instalação} é igual a energia consumida para instalação da estratégia na edificação (kWh).

A Equação 7 foi utilizada quando a estratégia de projeto avaliada foi substituída por outra estratégia existente na edificação.

$$EE = EE_{\text{estratégia}} + EE_{\text{transporte}} + EE_{\text{instalação}} - EE_{\text{estratégia substituída}} \quad (7)$$

Onde:

- EE é a energia embutida total (kWh);
 EE_{estratégia} é igual a energia embutida da estratégia de projeto pronta para sua instalação (kWh);
 EE_{transporte} é igual a energia consumida para o transporte da estratégia até a edificação (kWh);
 EE_{instalação} é igual a energia consumida para instalação da estratégia na edificação (kWh);
 EE_{estratégia substituída} é igual a energia consumida da estratégia existente na edificação (kWh).

Para calcular a energia embutida da estratégia foi necessário conhecer as características físicas dos diferentes materiais que compõem a estratégia de projeto. Dentre elas o número de materiais que compõem a estratégia assim como a quantidade de material como mostra a Equação 8.

$$EE_{\text{estratégia}} = \sum_{i=1}^n (EE_{\text{material}} \times M_{\text{material}}) \quad (8)$$

Onde:

- EE_{estratégia} é a energia embutida da estratégia de projeto;
 i é o material de construção discriminado;
 n é o tipo de material;
 EE_{material} é o conteúdo energético do material discriminado (kWh/kg);
 M_{material} é a quantidade de material (kg).

O levantamento de todos os processos produtivos de cada material que compõe uma estratégia de projeto é um processo extremamente complexo e demorado. Por esta razão o conteúdo energético de cada estratégia foi obtido através de bases de dados nacionais e internacionais. A quantidade de material dos diferentes componentes de uma estratégia de projeto foi avaliada através das especificações técnicas fornecidas pelo produtor ou na Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 14, 2012).

A energia de transporte é a energia consumida para o transporte da fábrica ou revendedor da estratégia até a edificação onde será instalada. Para calcular o consumo de energia de transporte foi necessário definir a distância do produtor da estratégia até a edificação e o tipo de transporte (Equação 9).

$$EE_{\text{transporte}} = E_{\text{comb}} \times M_{\text{material}} \times D_{\text{instalação}} \quad (9)$$

Onde:

$EE_{\text{transporte}}$ é a energia de transporte (kWh);

E_{comb} é o consumo energético do transporte utilizado (kWh/km/kg);

M_{material} é a massa do material (kg);

$D_{\text{instalação}}$ é a distância de transporte da estratégia de projeto do fabricante à edificação onde a estratégia será instalada (km).

Para determinar a energia embutida final foi necessário calcular a energia gasta para a instalação da estratégia de projeto. Para determinar a energia de instalação foram calculados os consumos de todas as atividades previstas como o transporte do trabalhador até a edificação, o uso dos respectivos equipamentos, além da energia consumida para o transporte e deposição do material de descarte na instalação. Através da Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 14, 2012), foi levantado o tempo necessário para a instalação da estratégia, assim como os equipamentos utilizados.

A Equação 10 mostra as fases para a avaliação da energia de instalação.

$$EE_{\text{instalação}} = E_{\text{equip}} + E_{\text{transm}} + (E_{\text{dcomb}} \times M_{\text{dmaterial}} \times D_{\text{desc}}) \quad (10)$$

Onde:

- $E_{E_{instalação}}$ é a energia embutida para a instalação da estratégia de projeto (kWh);
- E_{equip} é a energia consumida dos equipamentos para instalação da estratégia de projeto (kWh);
- $E_{transmo}$ é a energia consumida pelo transporte do trabalhador, da empresa até a edificação onde a estratégia foi instalada (kWh);
- E_{dcomb} é o consumo energético do transporte utilizado para o transporte do material descartado (kWh/km/kg);
- $M_{dmaterial}$ é a massa do material descartado (kg);
- D_{desc} é a distância de transporte do material de descarte até o aterro sanitário (km).

Assim como para o transporte da estratégia de projeto, também para o transporte da mão de obra foi considerada a viagem de ida e de volta. A Equação 11 foi utilizada quando o tempo para instalação da estratégia de projeto foi superior a oito horas de trabalho; nesse caso o consumo de energia para o transporte foi multiplicado pelo número de dias trabalhados.

$$E_{E_{transmo}} = E_{comb} \times D_{instalação} \times N_{mo} \times 2 \times D_t \quad (11)$$

Onde:

- $E_{E_{transmo}}$ é a energia consumida para o transporte da mão de obra (kWh);
- E_{comb} é o consumo energético do transporte utilizado (kWh/km);
- $D_{instalação}$ é a distância percorrida pelo trabalhador, da empresa até a edificação onde a estratégia foi instalada (km);
- N_{mo} é a quantidade de trabalhadores utilizados para a instalação da estratégia de projeto;
- D_t são os dias de trabalho da mão de obra.

A quantidade de material descartado durante a instalação foi obtida ou através dos dados fornecidos pelo fabricante ou na TCPO 14 (2012). A distância de transporte do material descartado da edificação até o aterro sanitário mais próximo foi de 50 km. O consumo de energia do meio de transporte foi calculado para os percursos de ida e de volta.

3.3.2. Energia Operacional

Após a avaliação da energia embutida da estratégia de projeto, a etapa sucessiva foi analisar a energia operacional da edificação. A energia operacional foi avaliada em duas condições diferentes através do programa de simulação *EnergyPlus 8.4*:

- com a edificação sem a estratégia de projeto;
- com a edificação após a instalação da estratégia de projeto.

Dessa forma foi possível identificar a eficiência da estratégia de projeto ao longo do uso dela na edificação. A Equação 12 propõe o cálculo da energia operacional economizada em um ano através do uso da estratégia de projeto.

$$EO_E = (EO_S - EO_C) \times V_{\text{útil}} \quad (12)$$

Onde:

EO_E é a energia operacional economizada (kWh);

EO_S é a energia operacional consumida em um ano na edificação sem a estratégia de projeto (kWh);

EO_C é a energia operacional consumida em um ano com a implementação da estratégia de projeto (kWh);

$V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação (anos).

Para avaliar as duas fases da energia operacional (sem e com a estratégia de projeto) o procedimento foi o mesmo. Dependendo da tipologia da edificação analisada, residencial ou comercial, o padrão de uso e ocupação do edifício, assim como as cargas internas dos equipamentos utilizados resultaram muito diferentes.

Para avaliar a edificação durante a fase operacional, com e sem as estratégias de projeto, foram considerados os efeitos das mudanças climáticas no consumo da edificação. Para isso foi utilizado o programa *Climate Change World Weather file Generator (CCWorldWeatherGen)* (JENTESH et al., 2008; JENTESH et al., 2013). Esta ferramenta, baseada no programa Microsoft® Excel, foi desenvolvida para gerar arquivos climáticos EPW (*EnergyPlus / EPSr Weather*) e TMY2 (*Dados Meteorológicos Típicos*) de qualquer local do mundo utilizando o cenário de emissões A2 (médio-alto) do IPCC em três diferentes datas futuras: 2020, 2050 e 2080. Este programa utiliza preferencialmente arquivos climáticos baseados em dados levantados entre 1961 e 1990. O uso de arquivos climáticos mais recentes pode superestimar os

resultados finais. A edificação sem e com as diferentes estratégias de projeto foi avaliada utilizando os três arquivos climáticos gerados pelo programa para se obter o consumo de energia e também as horas de conforto.

A análise do consumo operacional do edifício, nas duas etapas, foi realizada através de simulações computacionais com o programa *EnergyPlus* versão 8.4. Nos capítulos 4 e 5 são apresentadas todas as etapas para se obter a energia operacional dos dois estudos de caso.

Os dados de saídas da simulação da edificação avaliada foram o consumo de energia para resfriamento e o consumo de energia para aquecimento durante o ano. A energia operacional consumida pela edificação é a soma dos consumos para resfriamento e aquecimento. A edificação foi avaliada duas vezes: antes do uso da estratégia de projeto e após a sua aplicação (Equação 13).

$$EO_S \text{ e } EO_C = E_R + E_A \quad (13)$$

Onde:

EO_S é a energia operacional consumida sem a estratégia de projeto em um ano (kWh);

EO_C é a energia operacional consumida com uso da estratégia de projeto em um ano (kWh);

E_R é o consumo de energia para resfriamento da edificação (kWh);

E_A é o consumo de energia para aquecimento da edificação (kWh).

3.3.3. Energia de manutenção

Durante a vida útil das edificações os materiais de construção são repostos ou substituídos por vários motivos, como depreciação natural ou pelas condições de uso da edificação, ou pelo senso estético do usuário. Nesta pesquisa a energia de manutenção foi avaliada unicamente nas estratégias de projeto. Com o auxílio da Norma NBR 5674 (ABNT, 2012) foi possível identificar as atividades desenvolvidas para a manutenção dos componentes de uma edificação. O Quadro 2 mostra o tipo de manutenção e a periodicidade da mesma em diferentes elementos de um edifício de acordo com as indicações da NBR 5674 (ABNT, 2012).

Quadro 2 – Manutenção preventiva em uma edificação.

Elemento/ Componente	Periodicidade	Atividade	Responsável
Esquadrias de Alumínio	A cada três meses	Limpeza geral	Equipe de manutenção
Estrutural - Laje, viga e pilares	A cada ano	Verificar a integridade	Equipe especializada
Revestimento de paredes, pisos e teto.	A cada ano	Verificar a integridade	Equipe de manutenção
Esquadrias em Geral	A cada ano	Limpeza geral	Equipe de manutenção
Esquadrias de madeira e ferro	A cada dois anos	Pintar ou tratamento específico	Equipe especializada
Fachada	A cada três anos	Lavagem e Inspeção	Equipe de manutenção

Fonte: adaptado de ABNT (2012).

Como observado anteriormente, a energia de manutenção foi avaliada em três diferentes situações no estudo de caso brasileiro:

- 1- a estratégia de projeto não foi substituída ao longo da vida útil da edificação, e por isso a energia de manutenção foi igual à energia necessária para manter a estratégia (limpeza, pinturas, reparos, etc.). Neste caso foi utilizada a Equação 14.

$$EM_1 = EM_{\text{matm}} + EM_{\text{aplicação}} + EM_{\text{transporte}} + EM_{\text{aplicação}} \quad (14)$$

Onde:

EM_1 é a energia embutida de manutenção no caso 1 (kWh);

EM_{matm} é a energia embutida do material total para a manutenção da estratégia adotada (kWh);

$EM_{\text{aplicação}}$ é a energia consumida para a aplicação do material de manutenção (kWh);

$EM_{\text{transporte}}$ é a energia consumida para o transporte do material de manutenção até a edificação e do eventual descarte produzido pela manutenção (kWh) (Equação 4);

E_{transmo} é a energia consumida pelo transporte do trabalhador, da empresa até a edificação onde a estratégia foi instalada (kWh) (Equação 6).

A energia embutida total para a manutenção da estratégia da projeto foi avaliada de acordo com a quantidade de material necessário para a manutenção da estratégia de projeto, repetida durante a vida útil da edificação com a periodicidade estabelecida pela NBR 5674 (ABNT, 2012). A Equação 15 foi utilizada para calcular a energia embutida do material de manutenção.

$$EM_{\text{matm}} = EE_M * QM_{\text{man}} * N_M \quad (15)$$

Onde:

EM_{matm} é a energia embutida total para a manutenção da estratégia adotada (kWh);

EE_M é a energia embutida no material usado para manutenção (kWh);

QM_{man} é a quantidade de material utilizado para manutenção (kg);

N_M é a quantidade de manutenções ao longo do ciclo de vida.

A energia consumida para a aplicação do material de manutenção foi calculada através da Equação 16.

$$EM_{\text{aplicação}} = (E_{\text{equip}} * N_h) + (E_{\text{dcomb}} * M_{\text{dmaterial}} * D_{\text{desc}}) \quad (16)$$

Onde:

$EM_{\text{aplicação}}$ é a energia consumida para a aplicação do material de manutenção (kWh);

E_{equip} é a energia consumida pelos equipamentos para a manutenção da estratégia de projeto (kWh);

N_h é o tempo necessário para efetuar a manutenção (h);

E_{dcomb} é o consumo energético para o transporte do material descartado (kWh /km/kg);

$M_{\text{dmaterial}}$ é a massa do material descartado (kg);

D_{desc} é a distância de transporte do material de descarte até o aterro sanitário (km).

- 2- a estratégia de projeto foi substituída de acordo com a vida útil dos componentes construtivos da NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) (Equação 17).
- 3- a estratégia de projeto foi substituída de acordo com a vida útil dos materiais e obtida na literatura nacional e internacional (único cenário aplicado no estudo de caso italiano) (Equação 17).

$$EM_{2-3} = N_{\zeta} \times (EM_{\text{substituição}} + EM_{\text{transporte}} + EM_{\text{aplicação}} + EM_{\text{transmo}} + ED) + EM_{\text{mat}} \quad (17)$$

Onde:

EM_{2-3} é a energia embutida de manutenção nos cenários 2 e 3 (kWh);

N é a quantidade de vezes que a estratégia é substituída ao longo do ciclo de vida;

$EM_{\text{substituição}}$ é a energia embutida da estratégia de projeto em substituição da estratégia degradada (kWh) (Equação 8);

$EM_{\text{transporte}}$ é a energia consumida para o transporte do material de manutenção até a edificação e do eventual descarte produzido pela manutenção (kWh) (Equação 9);

$EM_{\text{aplicação}}$ é a energia consumida para a aplicação do material ou da estratégia de projeto substituída (kWh) (Equação 10);

EM_{transmo} é a energia consumida pelo transporte do trabalhador, da empresa até a edificação onde a estratégia foi instalada (kWh) (Equação 11);

ED é a energia de desconstrução (kWh) (Equação 19);

EM_{matm} é a energia embutida no material usado para manutenção da estratégia adotada (kWh) (Equação 15).

A quantidade de substituições da estratégia de projeto foi obtida por meio da Equação 18.

$$N = V_{\text{útil}} / V_{\text{estratégia}} \quad (18)$$

Onde:

N é a quantidade de vezes que a estratégia é substituída ao longo do ciclo de vida;

$V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação (anos) (Equação 1);

$V_{\text{estratégia}}$ é a vida útil da estratégia de projeto (anos).

A vida útil da estratégia de projeto foi obtida de acordo com a NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) ou na literatura nacional e internacional. Para avaliar a energia embutida da estratégia de projeto de substituição, a energia de transporte, a energia consumida na aplicação do material e a energia de transporte da mão de obra foram usadas as mesmas equações para avaliar a energia embutida da estratégia de projeto (Equações 8, 9, 10 e 11). A energia embutida no material para a manutenção da estratégia foi obtida por meio da Equação 15. A energia de desconstrução devida à substituição da estratégia será apresentada na próxima seção.

3.3.4. Energia de Desconstrução

A última fase do Ciclo de Vida Energético de uma edificação é a energia de desconstrução. Nesta fase foi avaliada unicamente a energia consumida para a desconstrução da estratégia de projeto. A fase de desconstrução focou exclusivamente nas operações de desmontagem, remoção e transporte do entulho até o aterro sanitário. Apesar da crescente importância da reciclagem e reaproveitamento dos materiais de construção, nesta pesquisa não foram levados em conta devido à falta de dados referentes ao mercado de materiais reciclados.

A Equação 19 mostra as fases para a avaliação da energia de desconstrução.

$$ED = (ED_{\text{equip}} \times Nh) + ED_{\text{transmo}} + (ED_{\text{trans}} \times M_{\text{dmaterial}} \times D_{\text{desc}}) \quad (19)$$

Onde:

ED é a energia de desconstrução (kWh);

ED_{equip} é a energia consumida pelos equipamentos para a remoção dos componentes da estratégia de projeto (kWh);

Nh é o tempo necessário para efetuar a demolição da estratégia de projeto (h);

ED_{transmo} é a energia consumida para o transporte da mão de obra (kWh) (Equação 6);

E_{dcomb} é a energia consumida pelo meio de transporte, relacionada à massa transportada e à distância (kWh/km/kg);

$M_{\text{dmaterial}}$ é a massa do material descartado para a instalação (kg);

D_{desc} é a distância de transporte dos componentes da estratégia de projeto de descarte até o aterro sanitário (km).

A Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 14, 2012) estabelece, para a demolição dos diferentes componentes construtivos de uma edificação, as horas de trabalho da mão de obra assim como os instrumentos utilizados para demolição. A energia consumida pelo meio de transporte da mão de obra assim como do material descartado é a mesma adotada nas fases de energia embutida e de manutenção. A distância de transporte do material descartado da edificação até o aterro sanitário foi estimada em 50 km.

3.3.5. Energia de Reuso

Pesquisas internacionais em matéria de ACV demonstraram que também a fase de reuso dos materiais provenientes da demolição de uma edificação pode representar uma etapa importante na avaliação do ciclo de vida (ADALBERTH, 1997; FAY, 1999; SCHEUER; KEOLEIAN; REPPE, 2003; TAVARES, 2006; NG; CHAU, 2015). Apesar disso, a norma europeia (EN 15804, 2012; EN 15978, 2011) define a fase de reuso como desnecessária devido à sua complexidade, enquanto considerado como crédito de energia embutida contabilizado nas novas edificações que utilizarem estes materiais. Mesmo assim, nesta pesquisa a energia de reuso foi avaliada a título informativo para analisar o possível reuso dos materiais presentes nas diferentes estratégias de projeto. A energia de reuso das estratégias de projeto foi obtida por meio da Equação 20.

$$PER = \sum_{i=1}^n (ER_{\text{material}} \times M_{\text{material}}) \quad (20)$$

Onde:

PER é o potencial de energia de reuso (kWh);

i é o material de construção discriminado;

n é o tipo de material;

ER_{material} é o conteúdo energético de reuso do material discriminado (kWh/kg);

M_{material} é a quantidade de material (kg).

3.3.6. Balanço Energético

O balanço energético é a energia economizada no ciclo de vida da edificação através do uso da estratégia de projeto analisada. O balanço energético foi estimado por meio da Equação 21.

$$BE = EO_E - (EE + EM + ED) \quad (21)$$

Onde:

BE é a balanço energético (kWh);

EO_E é a energia operacional economizada através da estratégia de projeto (kWh);

EE é energia embutida na estratégia de projeto (kWh);

EM é a energia de manutenção da estratégia de projeto (kWh);

ED é a energia de demolição da estratégia de projeto (kWh).

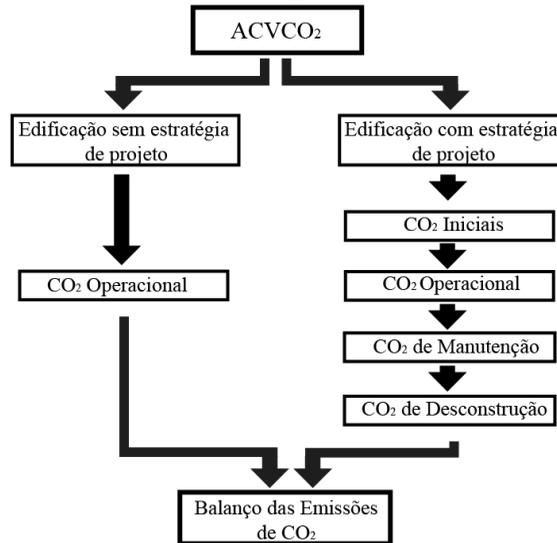
Através do balanço energético foi possível identificar se a estratégia realmente era energeticamente eficiente ao longo do ciclo de vida da edificação. Assim, caso o resultado do balanço energético fosse negativo ($BE < 0$) a estratégia de projeto analisada poderia ser considerada energeticamente ineficiente. Como observado anteriormente, a energia de manutenção foi avaliada em três diferentes situações. Ao mesmo tempo, também foram obtidos três resultados para balanço energético no estudo de caso brasileiro. Dessa forma pôde-se analisar em qual cenário a estratégia de projeto obteria o melhor desempenho energético.

Através dos resultados de balanço energético obtidos com as diferentes estratégias de projeto nos dois estudos de caso pretendeu-se identificar as estratégias mais adequadas no ciclo de vida em termos energéticos.

3.4. ACVCO₂ DAS ESTRATÉGIAS DE PROJETO

O terceiro parâmetro avaliado foi o indicador das emissões de CO₂ através da ACV. A Figura 7 mostra o método de avaliação do parâmetro das emissões de CO₂ nas estratégias de projeto.

Figura 7 – Fluxograma da avaliação do parâmetro das emissões de CO₂ nas estratégias de projeto.



3.4.1. Emissões de CO₂ iniciais

As emissões de CO₂ iniciais são as emissões devidas à produção, transporte, montagem e instalação dos materiais que compõem o edifício. Também na ACVCO₂ as emissões foram avaliadas unicamente para as estratégias de projeto utilizadas na edificação. Para o cálculo das emissões de cada estratégia de projeto foi utilizada a Equação 22.

$$CO_2I = CO_{2estrategia} + CO_{2transporte} + CO_{2instalacao} \quad (22)$$

Onde:

CO₂I são as emissões de CO₂ iniciais da estratégia (kgCO₂e) (kgCO₂);

CO_{2estrategia} são as emissões de CO₂ da estratégia de projeto pronta para sua instalação (kgCO₂e) (kgCO₂);

CO_{2transporte} são as emissões de CO₂ para o transporte da estratégia até a edificação (kgCO₂e) (kgCO₂);

$CO_{2\text{instalação}}$ são as emissões de CO_2 para a instalação da estratégia na edificação ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$).

A Equação 23 foi utilizada quando a estratégia de projeto avaliada substituiu uma estratégia existente na edificação.

$$CO_2E = CO_{2\text{estratégia}} + CO_{2\text{transporte}} + CO_{2\text{instalação}} - CO_{2\text{estratégia substituída}} \quad (23)$$

Onde:

CO_2E são as emissões de CO_2 iniciais da estratégia ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);

$CO_{2\text{estratégia}}$ são as emissões de CO_2 da estratégia de projeto pronta para sua instalação ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);

$CO_{2\text{transporte}}$ são as emissões de CO_2 para o transporte da estratégia até a edificação ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);

$CO_{2\text{instalação}}$ são as emissões de CO_2 para a instalação da estratégia na edificação ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);

$CO_{2\text{estratégia substituída}}$ são as emissões de CO_2 geradas da estratégia existente na edificação ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$).

Para calcular as emissões de dióxido de carbono da estratégia foi necessário conhecer as características físicas dos diferentes materiais que compunham a estratégia de projeto como mostra a Equação 24.

$$CO_{2\text{estratégia}} = \sum_{i=1}^n (CO_{2\text{material}} \times M_{\text{material}}) \quad (24)$$

Onde:

$CO_{2\text{estratégia}}$ são as emissões de CO_2 da estratégia de projeto ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);

i é o material de construção discriminado;

n é o tipo de material;

$CO_{2\text{material}}$ é o conteúdo das emissões de CO_2 do material discriminado ($kgCO_2e/kg$) ($kgCO_2/kg$);

M_{material} é a quantidade de material (kg).

A quantidade de material dos diferentes componentes de cada estratégia de projeto foi avaliada através das especificações técnicas fornecidas pelo produtor ou na Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 14, 2012).

As emissões de CO₂ foram avaliadas por meio da Equação 25.

$$CO_{2\text{transporte}} = CO_{2\text{comb}} \times M_{\text{material}} \times D_{\text{instalação}} \quad (25)$$

Onde:

- CO_{2transporte} são as emissões de CO₂ de transporte (kgCO₂e) (kgCO₂);
 CO_{2comb} é o fator de emissão de transporte utilizado (kgCO₂e/kg.km) (kgCO₂/kg.km);
 M_{material} é a massa do material (kg);
 D_{instalação} é a distância de transporte da estratégia de projeto do fabricante à edificação onde a estratégia foi instalada (km).

Enfim, para determinar as emissões de CO₂ finais foi necessário calcular as emissões produzidas para a instalação da estratégia de projeto. Para determinar as emissões da instalação foram calculadas todas as atividades previstas como o transporte do trabalhador até a edificação, o uso dos respectivos equipamentos, além das emissões de CO₂ produzidas para o transporte e deposição do material de descarte na instalação. Através da Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 14, 2012), foi levantado o tempo necessário para a instalação da estratégia, assim como os equipamentos utilizados.

A Equação 26 mostra as fases para a avaliação das emissões de CO₂ de instalação.

$$CO_{2\text{instalação}} = CO_{2\text{equip}} + CO_{2\text{transmo}} + (CO_{2\text{dcomb}} \times M_{\text{dmaterial}} \times D_{\text{desc}}) \quad (26)$$

Onde:

- CO_{2instalação} são as emissões de CO₂ geradas pela instalação da estratégia de projeto (kgCO₂e) (kgCO₂);
 CO_{2equip} são as emissões de CO₂ geradas dos equipamentos pela instalação da estratégia de projeto (kgCO₂e) (kgCO₂);
 CO_{2transmo} são as emissões de CO₂ geradas pelo transporte do trabalhador, da empresa até a edificação onde a estratégia foi instalada (kgCO₂e) (kgCO₂);
 CO_{2dcomb} é o fator de emissão de transporte utilizado (kgCO₂e/kg.km) (kgCO₂/kg.km);
 M_{dmaterial} é a massa do material descartado para a instalação (kg);
 D_{desc} é a distância de transporte do material de descarte até o aterro sanitário (km).

Assim como para o transporte da estratégia de projeto, também para o transporte da mão de obra foram considerados os percursos de ida e de volta. Quando o tempo para instalação da estratégia de projeto foi superior a oito horas de trabalho, as emissões geradas para o transporte foram multiplicadas pelo número de dias trabalhados, como mostra a Equação 27.

$$CO_{2\text{transmo}} = CO_{2\text{comb}} \times D_{\text{instalação}} \times N_{\text{mo}} \times 2 \times D_t \quad (27)$$

Onde:

- $CO_{2\text{transmo}}$ são as emissões de CO_2 geradas pelo transporte da mão de obra ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);
- $CO_{2\text{comb}}$ é o fator de emissão de transporte utilizado ($kgCO_2e/kg.km$) ($kgCO_2/kg.km$);
- $D_{\text{instalação}}$ é a distância percorrida pelo trabalhador, da empresa até a edificação onde a estratégia foi instalada (km);
- N_{mo} é a quantidade de trabalhadores utilizados para a instalação da estratégia de projeto;
- D_t são os dias de trabalho da mão de obra.

A quantidade de material descartado para a instalação foi obtido ou através dos dados fornecidos pelo fabricante ou na TCPO 14 (2012). A distância de transporte do material descartado da edificação até o aterro sanitário mais próximo foi de 50 km. O consumo de energia foi calculado para os percursos de ida e de volta do meio de transporte.

3.4.2. Emissões de CO_2 na fase operacional

As emissões de CO_2 na fase operacional foram avaliadas através dos valores de energia consumida para o aquecimento e resfriamento dos ambientes da edificação. A Equação 28 apresenta o cálculo para a avaliação das emissões de CO_2 produzidas na fase operacional.

$$CO_2O_E = (EO_S - EO_C) \times F_C \times V_{\text{útil}} \quad (28)$$

Onde:

- CO_2O_E são as emissões de CO_2 na fase operacional ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);
- EO_S é a energia operacional consumida em um ano na edificação sem a estratégia de projeto (kWh);

- EO_C é a energia operacional consumida em um ano com a implementação da estratégia de projeto (kWh);
- F_C é o fator de conversão das emissões de CO_2 geradas para produzir 1kWh de energia elétrica ($kgCO_2e/kWh$);
- $V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação (anos).

3.4.3. Emissões de CO_2 na fase de manutenção

Após a avaliação das emissões geradas ou economizadas na fase operacional através da aplicação das estratégias de projeto na edificação, o passo sucessivo foi avaliar as emissões de CO_2 na fase de manutenção.

Como observado anteriormente na avaliação das estratégias de projeto através da ACVE, também na $ACVCO_2$, a fase de manutenção foi avaliada em três diferentes situações no estudo de caso brasileiro:

- 1- no primeiro cenário a estratégia de projeto não foi substituída ao longo da vida útil da edificação, e por isso as emissões de CO_2 na manutenção foram referentes à energia necessária para manter a estratégia (limpeza, pinturas, reparos, etc.). Neste caso foi utilizada a Equação 29.

$$CO_{2-1} = CO_2M_{\text{matm}} + CO_2M_{\text{aplicação}} + CO_2M_{\text{transporte}} + CO_2M_{\text{aplicação}} \quad (29)$$

Onde:

- CO_{2-1} são as emissões de CO_2 de manutenção no caso 1 ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);
- CO_2M_{matm} são as emissões de CO_2 do material total para a manutenção da estratégia adotada ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);
- $CO_2M_{\text{aplicação}}$ são as emissões de CO_2 geradas pela aplicação do material de manutenção ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$);
- $CO_2M_{\text{transporte}}$ são as emissões de CO_2 geradas pelo transporte do material de manutenção até a edificação e do eventual descarte produzido pela manutenção ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$); (Equação 25);
- $CO_{2\text{transmo}}$ são as emissões de CO_2 geradas pelo transporte do trabalhador, da empresa até a edificação onde a estratégia foi instalada ($kgCO_2e$) ($kgCO_2$) (Equação 27).

As emissões totais para a manutenção da estratégia da projeto foram avaliadas de acordo com a quantidade de material necessário para

a manutenção da estratégia de projeto, repetida durante a vida útil da edificação com a periodicidade estabelecida pela NBR 5674 (ABNT, 2012). As emissões de CO₂ do material de manutenção foram obtidas por meio da Equação 30.

$$CO_2M_{\text{matm}} = CO_2I_M \times QM_{\text{man}} \times N_M \quad (30)$$

Onde:

CO₂M_{matm} são as emissões de CO₂ totais para a manutenção da estratégia adotada (kgCO₂e) (kgCO₂);

CO₂I_M são as emissões de CO₂ no material usado para manutenção (kgCO₂e) (kgCO₂);

QM_{man} é a quantidade de material utilizado para manutenção (kg);

N_M é a quantidade de manutenções ao longo do ciclo de vida.

As emissões de CO₂ geradas para a aplicação do material de manutenção foram calculadas por meio da Equação 31.

$$CO_2M_{\text{aplicação}} = (CO_{2\text{equip}} \times Nh) + (CO_{2\text{dcomb}} \times M_{\text{dmaterial}} \times D_{\text{desc}}) \quad (31)$$

Onde:

CO₂M_{aplicação} são as emissões de CO₂ geradas pela a aplicação do material de manutenção (kgCO₂e) (kgCO₂);

CO₂equip são as emissões de CO₂ geradas pelos equipamentos para a manutenção da estratégia de projeto (kgCO₂e) (kgCO₂);

Nh é o tempo necessário para efetuar a manutenção (h);

CO₂dcomb é o fator de emissão do combustível para o transporte utilizado (kgCO₂e/kg.km) (kgCO₂/kg.km);

M_{dmaterial} é a massa do material descartado (kg);

D_{desc} é a distância de transporte do material de descarte até o aterro sanitário (km).

- 2- a estratégia de projeto foi substituída de acordo com a vida útil dos componentes construtivos da NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) (Equação 32).
- 3- a estratégia de projeto foi substituída de acordo com a vida útil dos materiais, obtida na literatura nacional e internacional (único cenário aplicado no estudo de caso italiano) (Equação 32).

$$\text{CO}_2\text{M}_{2-3} = N_s \times (\text{CO}_2\text{M}_{\text{substituição}} + \text{CO}_2\text{M}_{\text{transporte}} + \text{CO}_2\text{M}_{\text{aplicação}} + \text{CO}_2\text{M}_{\text{transmo}} + \text{CO}_2\text{D}) + \text{CO}_2\text{M}_{\text{matm}} \quad (32)$$

Onde:

- $\text{CO}_2\text{M}_{2-3}$ são as emissões de CO_2 geradas nos cenários 2 e 3 (kgCO_2e) (kgCO_2);
- N_s é a quantidade de vezes que a estratégia foi substituída ao longo do ciclo de vida;
- $\text{CO}_2\text{M}_{\text{substituição}}$ são as emissões de CO_2 geradas pela estratégia de projeto em substituição da estratégia degradada (kgCO_2e) (kgCO_2) (Equação 23);
- $\text{CO}_2\text{M}_{\text{transporte}}$ são as emissões de CO_2 geradas pelo transporte do material de manutenção até a edificação e do eventual descarte produzido pela manutenção (kgCO_2e) (kgCO_2) (Equação 24);
- $\text{CO}_2\text{M}_{\text{aplicação}}$ são as emissões de CO_2 geradas pela aplicação do material ou da estratégia de projeto substituída (kgCO_2e) (kgCO_2) (Equação 25);
- $\text{CO}_2\text{M}_{\text{transmo}}$ são as emissões de CO_2 geradas pelo transporte da mão de obra (kgCO_2e) (kgCO_2) (Equação 26);
- CO_2D são as emissões de CO_2 geradas pela desconstrução (kgCO_2e) (kgCO_2) (Equação 34);
- $\text{CO}_2\text{M}_{\text{matm}}$ são as emissões de CO_2 geradas pelo material usado para manutenção da estratégia adotada (kgCO_2e) (kgCO_2) (Equação 30);

A quantidade de substituições da estratégia de projeto foi obtida por meio da Equação 33.

$$N_s = V_{\text{útil}} / V_{\text{estratégia}} \quad (33)$$

Onde:

- N_s é a quantidade de vezes que a estratégia foi substituída ao longo do ciclo de vida;
- $V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação (anos) (Equação 1);
- $V_{\text{estratégia}}$ é a vida útil da estratégia de projeto (anos).

A vida útil da estratégia de projeto foi obtida de acordo com a NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) ou na literatura nacional e internacional.

As emissões de CO₂ de desconstrução devido à substituição da estratégia estão apresentadas na próxima seção.

3.4.4. Emissões de CO₂ na fase de demolição

Na fase de demolição foram avaliadas as emissões geradas pelo transporte do material até o aterro sanitário e as emissões geradas pela mão de obra devido ao seu transporte e o eventual uso de equipamentos no canteiro. A Equação 34 apresenta o cálculo para a avaliação das emissões de desconstrução.

$$CO_2D = (CO_2D_{equip} \times Nh) + CO_2D_{transmo} + (CO_2D_{trans} \times M_{dmaterial} \times D_{desc} \times Nd \times 2) \quad (34)$$

Onde:

CO₂D são as emissões geradas para a desconstrução das estratégias (kgCO₂e) (kgCO₂);

ED_{equip} são as emissões geradas pelos equipamentos para a remoção dos componentes da estratégia de projeto (kgCO₂e) (kgCO₂);

Nh é o tempo necessário para efetuar a demolição da estratégia de projeto (h);

CO₂D_{transmo} são as emissões geradas para o transporte da mão de obra (kgCO₂e) (kgCO₂);

CO₂D_{trans} são as emissões geradas pelo meio de transporte, relacionada à massa transportada e à distância (kgCO₂e/kg.kg) (kgCO₂/kg.kg);

M_{dmaterial} é a massa do material descartado para a instalação (kg);

D_{desc} é a distância de transporte dos componentes da estratégia de projeto de descarte até o aterro sanitário (km);

Nd são os dias de trabalhos para a demolição da estratégia (dias).

3.4.5. Emissões de CO₂ na fase de reuso

Assim como para ACVE, também na avaliação das emissões no ciclo de vida foi analisado o potencial de reuso das estratégias e o impacto gerado. Esta fase da avaliação foi realizada a título informativo. As emissões geradas através da fase de reuso das estratégias de projeto foram estimadas por meio da Equação 35.

$$CO_2R = \sum_{i=1}^n (CO_2R_{material} \times M_{material}) \quad (35)$$

Onde:

CO_2R são as emissões geradas ou economizadas através do reuso da estratégia (kgCO₂e) (kgCO₂);
 i é o material de construção discriminado;
 n é o tipo de material;
 $CO_2R_{material}$ é o conteúdo das emissões de reuso do material discriminado (kgCO₂e /kg) (kgCO₂ /kg);
 $M_{material}$ é a quantidade de material (kg).

3.4.6. Balanço das emissões de CO₂

O balanço das emissões de CO₂ representa as emissões não geradas no ciclo de vida da edificação através do uso da estratégia de projeto analisada. O balanço das emissões de CO₂ foi avaliado através da Equação 36.

$$BCO_2 = CO_2O_E - (CO_2E + CO_2M + CO_2D - CO_2R) \quad (36)$$

Onde:

BCO_2 é o balanço das emissões de CO₂ (kgCO₂e) (kgCO₂);
 CO_2O_E são as emissões de CO₂ na fase operacional (kgCO₂e) (kgCO₂);
 CO_2M são as emissões geradas para a manutenção da estratégia (kgCO₂e) (kgCO₂);
 CO_2D são as emissões geradas para a desconstrução das estratégias (kgCO₂e) (kgCO₂).

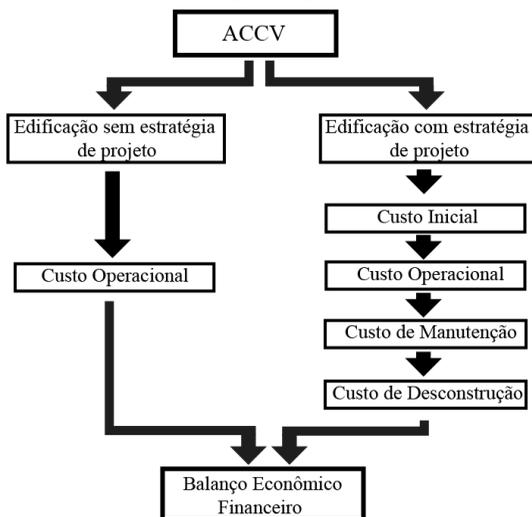
3.5. ACCV DAS ESTRATÉGIAS DE PROJETO

Após a análise do ciclo de vida energético e das emissões de CO₂ da edificação com e sem a estratégia de projeto, foi avaliado o custo financeiro da estratégia durante o ciclo de vida dela.

Esta quarta fase do método permite avaliar o último parâmetro da sustentabilidade, o econômico.

Assim como para ACVE e para ACVCO₂, também a Análise de Custo do Ciclo de Vida foi dividida em quatro etapas: custo inicial, custo de operação, custo de manutenção e custo de deposição (Figura 8). A ACCV foi realizada também nos diferentes cenários propostos para a manutenção no estudo de caso brasileiro.

Figura 8 – Fluxograma da avaliação do parâmetro de custo nas estratégias de projeto.



3.5.1. Custo Inicial

O custo inicial é o custo financeiro da estratégia de projeto do produto em si, mais o custo de transporte dela até a edificação, mais o custo de montagem e instalação. Para o cálculo do custo inicial foi utilizada a Equação 37.

$$CI = CI_{\text{estratégia}} + CI_{\text{transporte}} + CI_{\text{instalação}} \quad (37)$$

Onde:

CI é o custo inicial (R\$) (€);

CI_{estratégia} é o custo da estratégia de projeto pronta para sua instalação (R\$) (€);

CI_{transporte} é o custo para o transporte da estratégia (R\$) (€);

CI_{instalação} é o custo para instalação da estratégia (R\$) (€).

3.5.2. Custo Operacional

A aplicação da estratégia de projeto permitiu reduzir o consumo energético durante a vida útil da edificação onde a mesma foi instalada. Esta redução de energia elétrica se traduz, em termos econômicos, em menor gasto financeiro na conta de energia da edificação. A economia financeira na conta de energia foi estimada por meio da Equação 38.

$$EC = EO_E \times C_E \quad (38)$$

Onde:

EC é a economia financeira na conta de energia (R\$) (€);

EO_E é a energia operacional economizada (kWh);

C_E é a tarifa de energia por classe de consumo (R\$/kWh) (€/kWh).

Para avaliar o custo futuro da energia, foi utilizada a inflação média dos índices dos preços ao consumidor amplo (IPCA) dos últimos 10 anos como mostra a Equação 39.

$$C_E = ((C_{EA} \times I) + C_{EA}) \times V_{\text{útil}} \quad (39)$$

Onde:

C_E é o valor da energia por classe de consumo (R\$/kWh) (€/kWh);

C_{EA} é o valor atual da energia elétrica (R\$/kWh) (€/kWh);

I é a inflação média dos índices dos preços ao consumidor dos últimos 10 anos (%);

$V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação.

3.5.3. Custo de Manutenção

A terceira etapa da ACCV é a análise do custo de manutenção. Esta é a combinação de todas as ações destinadas a manter a estratégia de projeto no estado no qual possa desempenhar sua função. Como observado anteriormente, a fase de manutenção foi avaliada em três diferentes cenários também na Análise de Custo do Ciclo de Vida no estudo de caso brasileiro enquanto no estudo de caso na Itália foi avaliada em um único cenário.

No primeiro cenário, como mostra a Equação 40, a estratégia de projeto não foi substituída ao longo do ciclo de vida da edificação.

$$CM = CM_{\text{mat}} + CM_{\text{transporte}} + CM_{\text{aplicação}} \quad (40)$$

Onde:

CM é o custo de manutenção (R\$) (€);

CM_{mat} é o custo do material usado para a manutenção da estratégia (R\$) (€);

CM_{transporte} é o custo de transporte do material para manutenção até a edificação (R\$) (€);

CM_{aplicação} é o custo da mão de obra para executar a manutenção (R\$) (€).

Com o auxílio da NBR 5674 (ABNT, 2012) foi possível identificar as atividades necessárias e a periodicidade para a manutenção dos diversos componentes de uma edificação. Dessa forma foi possível quantificar o custo de manutenção da estratégia de projeto utilizando a Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 14, 2012), que fornecem os custos para o desenvolvimento das atividades de manutenção da mão de obra. O custo do material de manutenção considerou a inflação média dos índices dos preços ao consumidor amplo (IPCA) dos últimos 10 anos no Brasil e na Itália.

A Equação 41 mostra o cálculo do custo do material de manutenção.

$$CM_{\text{mat}} = CM_{\text{atual}} \times I \times A_M \quad (41)$$

Onde:

CM_{mat} é o custo do material usado para a manutenção da estratégia ao longo do ciclo de vida (R\$) (€);

CM_{atual} é o custo do material usado para a manutenção da estratégia atualmente (R\$) (€);

I é a inflação média dos índices dos preços ao consumidor dos últimos 10 anos (%);

A_M são os anos após a instalação, quando foi feita a manutenção (adimensional).

O custo da gasolina praticado na pesquisa foi o valor praticado no mercado atualmente, no local onde foi avaliada a edificação, corrigido pela inflação média dos produtos ao consumidor dos últimos 10 anos.

Nos outros dois cenários a estratégia de projeto foi substituída após terminar sua vida útil. Neste caso a vida útil da estratégia de

projeto foi identificada ou através da NBR 15-575 (ABNT, 2013) ou na literatura nacional ou internacional. Nestes dois cenários foi utilizada a Equação 42.

$$CM = CM_{\text{sub}} + CM_{\text{mat}} + CM_{\text{transporte}} + CM_{\text{aplicação}} \quad (42)$$

Onde:

- CM é o custo de manutenção (R\$) (€);
 CM_{sub} é o custo de substituição (R\$) (€);
 CM_{mat} é o custo do material usado para a manutenção da estratégia (R\$) (€);
 CM_{transporte} é o custo de transporte do material para manutenção até a edificação (R\$) (€);
 CM_{aplicação} é o custo da mão de obra para executar a manutenção (R\$) (€).

O custo de substituição é o custo necessário para comprar novamente a estratégia de projeto, a sua instalação e transporte. A isso são somados os custos de desconstrução para remover a estratégia de projeto desgastada. Através da inflação média dos Índices dos Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) dos últimos 10 anos no Brasil e na Itália foi possível estimar o custo de substituição futuro. A Equação 43 mostra como foi calculado o custo de substituição.

$$CM_{\text{sub}} = I \times V_{\text{estratégia}} \times (CI + CD) \quad (43)$$

Onde:

- CM_{sub} é o custo de substituição (R\$) (€);
 I é a inflação média dos índices dos preços ao consumidor dos últimos 10 anos (%);
 V_{estratégia} são os números de anos da vida útil da estratégia de projeto a ser substituída (anos);
 CI é o custo inicial (R\$) (€);
 CD é o custo de desconstrução (R\$) (€).

3.5.4. Custo de Desconstrução

A última etapa da análise de custo foi a avaliação do custo de desconstrução da estratégia de projeto. A fase de desconstrução focou

exclusivamente nas operações de desmontagem, remoção e transporte do entulho até o aterro sanitário.

A Equação 44 apresenta o cálculo para a avaliação do custo de desconstrução.

$$CD = (C_{mobra} + C_{transporte} + C_{descarte}) \times I \times V_{\text{útil}} \quad (44)$$

Onde:

CD é o custo de desconstrução (R\$) (€);

C_{mobra} é o custo da mão de obra para remoção dos componentes da estratégia de projeto (R\$) (€);

$C_{transporte}$ é o custo de transporte dos componentes da estratégia de projeto (R\$) (€);

$C_{descarte}$ é o custo financeiro do descarte dos componentes da estratégia em aterro sanitário (R\$) (€);

I é a inflação média dos índices dos preços ao consumidor dos últimos 10 anos (%);

$V_{\text{útil}}$ é a vida útil da edificação (anos).

Para avaliar o custo de demolição da estratégia de projeto foi utilizada a Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO 14, 2012).

3.5.5. Balanço econômico financeiro

O balanço econômico financeiro é o custo financeiro para o uso da estratégia de projeto ao longo da vida útil da edificação. Aos custos iniciais, de manutenção e demolição final, foi subtraída a economia financeira obtida através da redução do consumo de energia ao longo da vida da edificação. Assim, o balanço econômico financeiro foi avaliado por meio da Equação 45.

$$BEF = EC - (CI + CM + CD) \quad (45)$$

Onde:

BEF é o balanço econômico financeiro (R\$) (€);

EC é a economia de custos durante a fase operacional através do uso da estratégia de projeto (R\$) (€);

CI é o custo inicial da estratégia de projeto (R\$) (€);

CM é o custo de manutenção da estratégia de projeto (R\$) (€);

CD é o custo de demolição da estratégia de projeto (R\$) (€).

Se o balanço econômico financeiro for positivo, a estratégia de projeto é considerada economicamente viável.

3.6. ANÁLISE DOS QUATRO PARÂMETROS DA SUSTENTABILIDADE

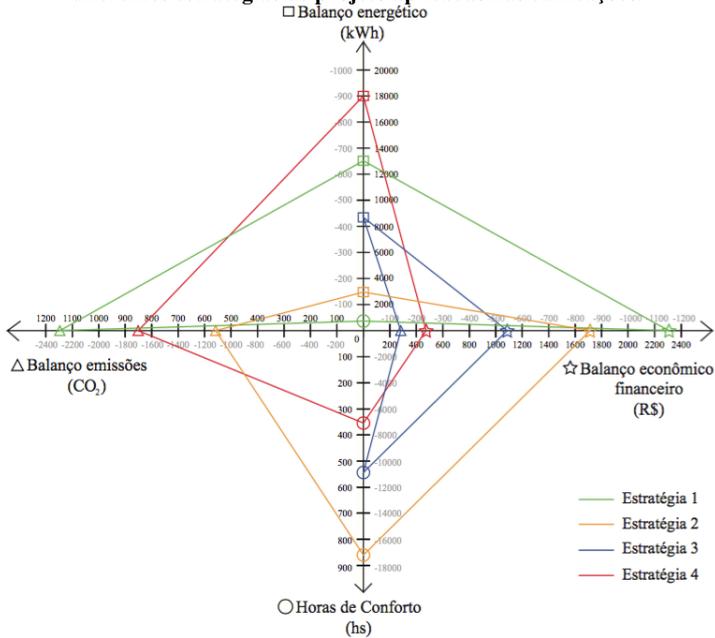
Avaliadas as estratégias de projeto através do conforto térmico, da ACVE, das emissões de CO₂ e da ACCV, os quatro parâmetros de análise das estratégias de projeto foram avaliados conjuntamente para possibilitar a melhor escolha da estratégia aplicada na edificação. Através desta análise pretendeu-se alcançar dois objetivos:

- verificar a existência de uma relação entre os quatro parâmetros avaliados nas estratégias de projeto;
- e auxiliar o projetista na escolha da estratégia com a melhor relação entre conforto térmico, consumo energético, emissões de CO₂ e economia financeira.

Para isso foram analisados e comparados os resultados dos quatro parâmetros de análise de todas as estratégias de projeto nos diferentes cenários avaliados. A Figura 7 apresenta o gráfico utilizado para analisar a relação entre balanço das horas de conforto, balanço energético, balanço das emissões de CO₂ e balanço econômico financeiro das estratégias de projeto aplicadas na edificação. Gráficos deste tipo permitem avaliar com maior facilidade resultados que apresentam variáveis diferentes, como também mostrado na pesquisa de Triana (2016).

Como mostra o exemplo da Figura 9, quanto maior a área do quadrilátero produzido no gráfico, melhor será o desempenho nos quatro parâmetros da estratégia na vida útil da edificação. Este tipo de representação gráfica permite verificar claramente quais das estratégias obteve o melhor desempenho nos diferentes parâmetros. Porém, é difícil selecionar a melhor estratégia nos quatro parâmetros da sustentabilidade. Enquanto uma estratégia pode obter melhores resultados no parâmetro energético e no das emissões, por outro lado esta mesma estratégia pode obter resultados intermediários nos outros dois parâmetros em comparação com outra estratégia de projeto. Por esta razão decidiu-se aprimorar a avaliação e a escolha das diferentes estratégias de projeto em uma edificação através do método de tomada de decisão multicritério (MMAD).

Figura 9 – Relação entre os quatro parâmetros da sustentabilidade das diferentes estratégias de projeto aplicadas nas edificações.



Para obter um resultado mais claro e para identificar de forma mais rápida a melhor solução de projeto, foi utilizado o método da análise de decisão multicritério. Entre os diferentes métodos presentes na literatura foram escolhidos o método AHP (Analytic Hierarchy Process) e o método de decisão multicritério COPRAS (*Complex Proportional Assessment*) (KAKLAUSKAS et al., 2006; RABBANI et al., 2014). Para analisar e definir a importância dos quatro parâmetros um questionário foi aplicado a 30 profissionais da área da construção civil (Apêndice A). Esses profissionais foram escolhidos entre três áreas distintas no setor da construção civil em igual número:

- Projetistas (Arquitetos e Engenheiros);
- Pesquisadores / Professores;
- Técnicos no setor da administração pública (Arquitetos e Engenheiros).

Dessa forma foi possível obter uma avaliação diversificada em um tema de extrema atualidade e de competência das três figuras

profissionais. Os pesquisadores e os professores entrevistados trabalham no Politécnico de Milão em diferentes áreas de pesquisas, enquanto os técnicos entrevistados atuam em diferentes municípios da província de Bérgamo e Milão. Os projetistas entrevistados atuam na região da Lombardia.

Para a avaliação dos diferentes parâmetros foi utilizada a escala de Saaty (2008) que varia do valor 1 (igual importância entre os parâmetros comparados) até 9 (extremamente mais importante). Após a obtenção dos resultados das comparações através do questionário, o passo sucessivo foi a avaliação dos dados através da forma matricial apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Forma matricial utilizada no método AHP.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Nesta tese a matriz gerada foi uma matriz quadrada 4 x 4, onde as linhas e colunas correspondem aos quatro parâmetros analisados na pesquisa. Os elementos da matriz devem satisfazer às condições:

- a) $a_{ij} = a$;
- b) $a_{ji} = 1/a$;
- c) $a_{ii} = 1$.

Onde:

a é a comparação paritária entre os fatores e sub-fatores e refere-se ao valor de julgamento de importância relativa. A resolução da matriz A resulta no autovetor de prioridades w , que expressa as importâncias relativas (pesos) de cada um dos fatores e sub-fatores.

Também é avaliado o grau de consistência (CR – *Consistency Ratio*) para determinar a qualidade dos dados adquiridos. Segundo Saaty (2008), a condição de consistência dos julgamentos é $CR \leq 0,10$. A razão de consistência foi calculada por meio da Equação 46.

$$CR = CI / RI \quad (46)$$

Onde:

CR é a razão de consistência (adimensional);

CI é o índice de consistência (adimensional);

RI é o índice de consistência randômico (adimensional).

O índice de consistência randômico é obtido através da Tabela 5 e nesta pesquisa equivale a 0,9.

Tabela 5 – Índice de consistência randômico em base aos números de parâmetros.

RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

O índice de consistência é obtido por meio da Equação 47.

$$CI = \lambda - n / n - 1 \quad (47)$$

Onde:

λ é o maior autovalor da matriz de julgamentos (adimensional);

n é a ordem da matriz (adimensional);

Obtidos os autovetores w de prioridades para cada um dos quatro parâmetros (energético, emissões, conforto térmico e de custos) e o grau de consistência, o passo sucessivo foi identificar a estratégia de projeto com o melhor desempenho através do método COPRAS. Este método funciona como um *ranking* de avaliação em termos de seu significado e grau de utilidade das alternativas. O algoritmo do método COPRAS consiste em cinco etapas:

- 4- Normalizar a matriz D , composta para os quatro critérios, os autovetores w e o desempenho das diferentes soluções de projeto nos quatro parâmetro da sustentabilidade, através da Equação 48.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \text{para } j=1,2,\dots,n \quad (48)$$

Onde:

x_{ij}^* é o valor da performance normalizada (adimensional);

x_{ij} é o valor da performance (adimensional).

- 4- Determinar a matriz de decisão normalizada ponderada D' por meio da Equação 49.

$$D' = [dij]_{m \times n} = x^*_{ij} \cdot w_j \quad (49)$$

Onde:

D' é a matriz de decisão normalizada (adimensional);

w é o autovetor de prioridade (adimensional);

x^*_{ij} é o valor da performance normalizada (adimensional).

- 3- As somas S_{i+} e S_{i-} dos valores normalizados são calculadas para ambos os critérios. Para critérios benéficos, são os maiores valores e para os não benéficos são os menores valores. As somas S_{i+} e S_{i-} são calculadas usando as Equações 50 e 51.

$$S_{i+} = \sum_{j=1}^k dij \quad (50)$$

$$S_{i-} = \sum_{j=1}^k dij \quad (51)$$

Onde:

S_{i+} é a soma dos valores normalizados máximos (adimensional);

S_{i-} é a soma dos valores normalizados mínimos (adimensional).

- 4- Determinar a importância relativa ou prioridade da alternativa candidata Q_i por meio da Equação 52.

$$Q_i = S_{i+} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{i-}}{S_{i-} - \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{i-}}} \quad (52)$$

Onde:

Q_i é a importância relativa de uma alternativa (adimensional).

Entre as alternativas, aquela com o maior valor de importância relativa é a melhor escolha.

- 5- Enfim é obtido o índice P_i de cada solução de projeto através da Equação 53.

$$P_i = \left[\frac{Q_i}{Q_{max}} \right] \times 100\% \quad (53)$$

Onde:

- P_i é o grau de utilidade de cada estratégia de projeto (adimensional);
 Q_i é a importância relativa de uma alternativa (adimensional);
 Q_{\max} é o valor máximo da importância relativa (adimensional).

Através do grau de utilidade foi possível obter a classificação das soluções de projeto mais adequadas para a edificação onde foram aplicadas.

O método aqui apresentado permite a avaliação, através dos quatro parâmetros da sustentabilidade, das estratégias de projeto aplicadas nas edificações. O objetivo é que o presente método possa ser utilizado em qualquer edificação e lugar. Por esta razão, os capítulos 4 e 5 apresentam em detalhes as características dos estudos de caso assim como as bases de dados utilizadas nos quatro parâmetros.

4. ESTUDO DE CASO BRASILEIRO

Após a apresentação do método de pesquisa, neste capítulo são descritos em detalhe todos os dados utilizados no método proposto além dos materiais, os equipamentos e os programas utilizados para analisar as diferentes estratégias de projeto no estudo de caso avaliado no Brasil.

O estudo de caso avaliado no Brasil é uma edificação unifamiliar de interesse social (CAIXA, 2007). A edificação foi avaliada com uma vida útil de 63 anos (ABNT, 2013) em três zonas bioclimáticas brasileiras nas cidades de Curitiba, Florianópolis e Belém. A Tabela 6 apresenta as condições climáticas das cidades escolhidas. Os arquivos climáticos utilizados, referente à cidade onde se localiza a edificação objeto de estudo, foram obtidos no site www.procelinfo.com.br/etiquetagem_edificios, em formatos TRY (*Test Reference Year-type*).

Observou-se que as três cidades escolhidas apresentam condições climáticas diferentes entre si, onde Curitiba representa o clima mais frio, Florianópolis um clima ameno e Belém a cidade mais quente.

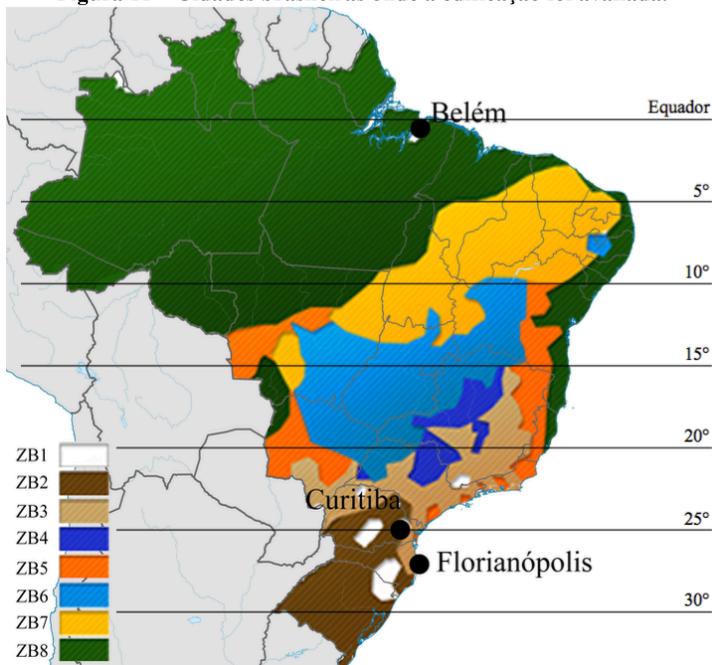
Tabela 6 – Cidades brasileiras onde é avaliado o estudo de caso.

Zona bioclimática - Cidade	ZB1- Curitiba	ZB3- Florianópolis	ZB8 - Belém
Coordenadas	25°26'09"S 49°16'21"W	27°50'S 48°25'W	1°27'21"S 48°30'14"W
Altitude (m)	935	3	10
Ano	TRY	TRY	TRY
Arquivo climático	1969	1963	1962
Temperatura bulbo seco (°C)	Média anual	16,4	20,7
Umidade relativa (%)		86,3	85,1
Radiação global (Wh/m ²)		196,7	172,9
		230,0	

A Figura 11 apresenta a localização das três cidades no zoneamento bioclimático brasileiro.

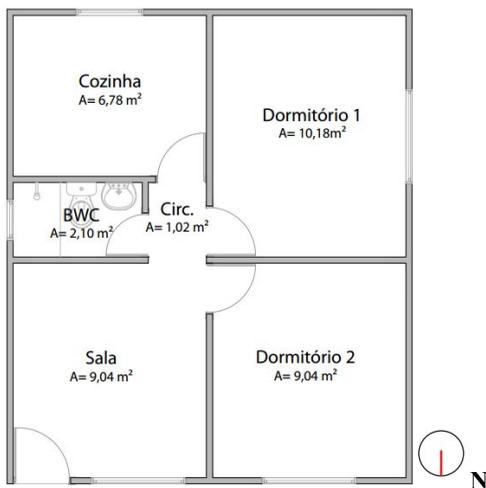
Para analisar o desempenho energético da edificação residencial nos cenários futuros, como observado anteriormente, foi utilizada a ferramenta *CCWorldWeatherGen – Climate Change World Weather File Generator* (JENTESH et al., 2008; JENTESH et al., 2013).

Figura 11 – Cidades brasileiras onde a edificação foi avaliada.



4.1. CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

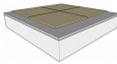
A edificação residencial avaliada é um projeto padrão de habitação popular unifamiliar desenvolvido pela CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (2007). O edifício possui um pavimento em contato direto com o solo e pé-direito de 2,60 m. É composto por uma cozinha, um banheiro, dois quartos e uma sala, totalizando 38,16 m². A casa foi avaliada em uma única orientação representada na Figura 12.

Figura 12 – Planta baixa do estudo de caso brasileiro.

Fonte: adaptado CAIXA (2007).

A edificação apresenta paredes internas e externas em blocos de alvenaria com reboco em argamassa sem pintura externa. A cobertura é inclinada em duas águas, com telha cerâmica, estrutura de madeira e forro de PVC. O piso do edifício é em concreto maciço com revestimento em piso cerâmico (Tabela 7).

Tabela 7 – Propriedades térmica da cobertura e das paredes do edifício residencial.

Tipo	Características	U (W/m ² K)	Ct (kJ/m ² K)	α (adm)
	Forro PVC (1,0 cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica	1,75	21	0,35
	Bloco cerâmico (9,0x 14,0x 24,0cm) Argamassa interna (2,5 cm) Argamassa externa(2,5 cm)	2,46	150	0,50
	Concreto maciço (10 cm) Contrapiso (2,0 cm) Piso cerâmico(0,75 cm)	4,00	294	-

Fonte: adaptado NBR 15220 (2003).

As janelas da edificação apresentam as características apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características das aberturas da edificação residencial.

Tipo	Cômodo	Dimensões [cm]	Características	U (W/m²K)	FS (%)
	Dormitórios e Sala	120x120	Janela de correr de duas folhas com vidro simples incolor de 3mm.	5,00	85
	Cozinha	100x100	Janela Maxim-ar com vidro simples incolor de 3mm.	5,00	85
	Banheiro	60x60			

Fonte: adaptado NBR 15220 (2003).

4.1.1. Configuração do modelo residencial para simulação

Uma vez identificada a edificação residencial unifamiliar para o desenvolvimento da pesquisa, foi realizado o modelo para a simulação do comportamento termoenergético do edifício através do programa *EnergyPlus* versão 8.4. Então, após a coleta dos dados relativos às características geométricas e físicas da edificação, foi possível criar o modelo geométrico do edifício através do *plugin Open Studio*, dentro do programa *SketchUp*, que permite a inserção das coordenadas da edificação. A edificação é composta por cinco zonas térmicas: sala, cozinha, banheiro e os dois dormitórios (Figuras 13 e 14).

Figura 13– Planta da edificação residencial com as zonas térmicas.

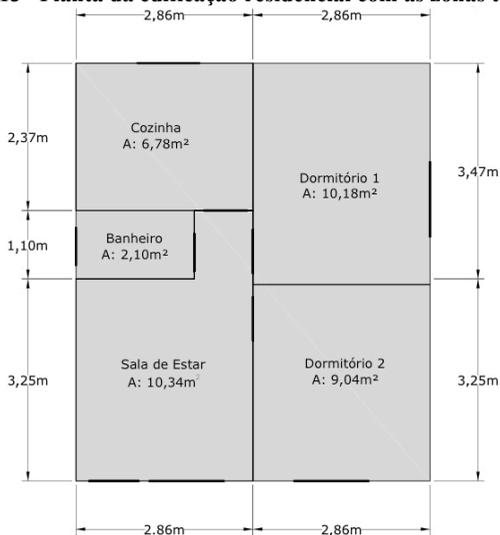


Figura 14– Modelo geométrico da edificação residencial



Como observado, a edificação residencial está em contato direto com o solo. As trocas de calor entre o piso e solo foram calculadas através do objeto *Site:GroundDomain:Slab*, presente no *EnergyPlus*. Após a primeira simulação da edificação, os dados de temperatura média mensal do solo são obtidos e novamente inseridos no programa

computacional para simular o comportamento termoenergético da edificação.

Os materiais que compõem a envoltória da edificação foram inseridos no programa *EnergyPlus* através dos objetos *BuildingSurface: Detailed* e *FenestrationSurface: Detailed*.

A potência instalada dos equipamentos e da iluminação assim como o uso e ocupação das cinco zonas do estudo de caso foram inseridos no programa *EnergyPlus* de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Cargas internas e padrão de uso das edificações residenciais no estudo de caso brasileiro.

Ambiente	Item		Especificação	Fonte
Sala	Ocupação média		4 pessoas	RTQ-R (2012)
	Densidade de Carga interna	Iluminação	6 W/m ²	
		Equipamentos	1,5 W/m ²	
		Atividade	60 W/m ²	
	Padrão de uso	Ocupação	11-12; 17-21 h	
		Iluminação	11-12; 17-21 h	
Equipamentos		0-24 h		
Dormitório	Ocupação média		2 pessoas/dormitório	RTQ-R (2012)
	Densidade de Carga interna	Iluminação	5 W/m ²	
		Equipamentos	1,5 W/m ²	
		Atividade	45 W/m ²	
	Padrão de uso	Ocupação	21-9 h	
		Iluminação	7-9; 21-22 h	
Equipamentos		7-9; 21-22 h		

A potência da iluminação em cada ambiente foi configurada nos objetos *Lights* e a potência dos equipamentos através do objeto *ElectricEquipment*. Os dados referentes ao uso e operação foram inseridos no objeto *Schedule:compact*, e depois utilizados nos objetos *People* (referente à ocupação), *Lights* (referente ao padrão de uso das lâmpadas), *ElectricEquipment* (referente ao padrão de uso dos equipamentos).

O modelo foi avaliado em dois diferentes cenários: o primeiro quando ventilado naturalmente e no segundo cenário quando condicionado artificialmente. O edifício residencial foi analisado em condições de ambiente naturalmente ventilado para verificar o seu comportamento nesta situação e determinar o parâmetro de conforto na pesquisa. Dessa forma foi possível avaliar se o edifício, após o uso das estratégias de projeto, melhorou o próprio desempenho térmico e não somente o desempenho energético.

A simulação do modelo quando ventilado naturalmente foi realizada através do objeto *AirflowNetwork*. Neste objeto são definidas as superfícies por onde acontecem as trocas de ar e as propriedades relativas a esta troca. O controle da ventilação foi dado pela temperatura, juntamente com as rotinas de abertura de portas e janelas. Adotou-se como temperatura de *set point* 20°C de acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (2012). Quanto às rotinas de operação, estas foram determinadas conforme o uso da edificação apresentado na Tabela 19. Os parâmetros de simulação para a modelagem da rede de ventilação natural são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Descrição dos dados de entrada dos parâmetros da ventilação natural.

Parâmetros	Valores adotados
1- Coeficiente de pressão	LowRise (Swami & Chandra)
2- Coeficiente de descarga	0,60
3 - Coeficiente de frestas quando a janela está fechada	0,001; n = 0,65
4 - Coeficiente de frestas quando a janela está aberta	0,5; n = 1
5 - Rugosidade do entorno	0,33 - <i>City</i>

Após a avaliação do edifício quando ventilado naturalmente a edificação foi simulada quando condicionada artificialmente. Para isso

foi necessário criar um sistema de ar-condicionado pré-dimensionado através do objeto *HVAC TemplateZone:PTHP*. Foi definida a temperatura de controle (*HVAC Template: Thermostat*) de 19,5°C para aquecimento, de acordo com a pesquisa desenvolvida por De Vecchi et al. (2014) e 24°C para resfriamento (RTQ-R, 2012). Os Objetos de saídas do programa *EnergyPlus* a ser requerido foi: *HeatingCoilDefrost Eletric Power*, *HetaingCoil Eletric Power* e *CoolingCoil Eletric Power*.

O Quadro 1 resume os parâmetros e os objetos configurados no modelo do edifício residencial para as simulações através do programa *EnergyPlus*. Estes parâmetros foram utilizados da mesma forma no edifício com e sem as alterações de projeto.

Quadro 3 – Configuração dos parâmetros da edificação no programa *EnergyPlus*.

Bloco	Parâmetros	Objetos
Forma	Dimensões Proporções Ambientes (zonas) Dimensão das aberturas Elementos de sombreamento Orientação da fachada Manobra da aberturas	<i>Zone</i> <i>BuildingSurface: Detailed</i> <i>FenestrationSurface: Detailed</i> <i>Shading: Building: Detailed</i> <i>AirflowNetwork</i>
Materiais	Composição das paredes Composição da cobertura Composição dos pisos Absortância externa Contato com o solo Materiais das esquadrias	<i>Material</i> <i>WindowMaterial: Glazing</i> <i>Construction</i> <i>BuildingSurface: Detailed</i> <i>Slab</i> <i>FenestrationSurface: Detailed</i> <i>AirflowNetwork</i>
Potência Instalada	Potência instalada de iluminação em cada ambiente Potência instalada dos equipamentos em cada ambiente	<i>Lights</i> <i>ElectricEquipment</i>
Operação	Quantidade de moradores Padrão de ocupação dos ambientes Uso de equipamentos, iluminação e ar-condicionado Operação de portas e janelas	<i>Schedule Compact</i> <i>People</i> <i>Lights</i> <i>ElectricEquipment</i> <i>HVAC TemplateZone: PTHP</i> <i>AirflowNetwork</i>
Dados de Saída	Temperatura e umidade interna de cada ambiente Consumo de energia para aquecimento Consumo de energia para resfriamento	<i>Zone Air Temperature</i> <i>Zone Air RelativeHumidity</i> <i>HeatingCoilDefrost Electric Power</i> <i>HeatingCoil Electric Power</i> <i>CoolingCoil Electric Power</i>

4.1.2. Estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro

Para a aplicação do método foram escolhidas diferentes estratégias de projeto avaliadas na edificação residencial. Dessa forma foi possível avaliar quais das estratégias obteve o melhor desempenho térmico, energético, de emissões de CO₂ e de custo no ciclo de vida da edificação de interesse social.

Foram escolhidas apenas algumas das estratégias de projeto presentes no mercado atual da construção civil. As estratégias foram divididas em cinco categorias distintas, como mostra a Tabela 11. Além das dez estratégias de projeto que foram implementadas na edificação, foram analisadas também a janela com vidro simples e o forro de PVC, duas estratégias presentes no caso base da edificação e que foram substituídas com as estratégias da janela de vidro duplo e da laje mista, respectivamente.

Tabela 11 – Estratégias de projeto a ser avaliadas na edificação residencial.

Categoria	Estratégia de projeto	Material	Quantidade (kg)
Acabamento paredes externas	1- Pintura com tinta acrílica	- Tinta	8,1
	2- Revestimento com pastilhas cerâmicas	- Pastilhas cerâmicas 6.5x25	780,0
		- Argamassa 4 mm	559,0
Isolamento térmico da envoltória	3- Isolamento em lã de rocha	- Lã de rocha	593,0
	4- Isolamento em EPS	- EPS	207,5
Janelas	5- Janelas em alumínio com vidro duplo	- Vidro	109,0
		- Alumínio	72,0
	6- Janelas de alumínio com vidro simples	- Vidro	27,2
		- Alumínio	32,2
Forro	7- Laje pré-moldada	- Cerâmica	1535,6
		- Concreto	7585,1
		- Argamassa	1710,0
		- Aço	140,0
	-Tinta	2,5	
8- Forro de PVC	- PVC	77,2	
Elementos de sombreamento	9- Cobogó de concreto	- Concreto	329,4
		- Argamassa	39,0
	10- Veneziana de correr em alumínio	- Alumínio	34,5
		- Aço	2,1
	11- Persiana integrada em PVC	- PVC	15,1
		- Aço	15,0
	12- Veneziana de madeira	- Madeira	60,0
- Aço		3,6	
- Tinta		0,8	

Por cada estratégia foi necessário modificar o modelo da edificação elaborado no programa de simulação computacional *EnergyPlus*, inserindo as características geométricas e físicas de cada estratégia. A Tabela 12 apresenta as características da envoltória da edificação com a aplicação das estratégias de projeto.

Tabela 12 – Características da envoltória da edificação em as estratégias de projeto.

Estratégia de projeto	Paredes Externas			Cobertura			Janelas	
	U (W/m ² K)	Ct (kJ/m ² K)	α (adm)	U (W/m ² K)	Ct (kJ/m ² K)	α (adm)	U (W/m ² K)	FS (%)
Pintura com tinta acrílica	2,46	150	0,30	1,75	21	0,35	5,00	85
Revestimento com pastilhas cerâmicas	2,25	150	0,30	1,75	21	0,35	5,00	85
Isolamento em lâ de rocha (5cm)	0,55	156	0,50	0,54	24	0,35	5,00	85
Isolamento em EPS (5cm)	0,60	157	0,50	0,59	25	0,35	5,00	85
Janelas vidro duplos	2,46	150	0,50	1,75	21	0,35	2,70	85
Laje pré-moldada	2,46	150	0,50	2,05	258	0,35	5,00	85
Cobogó de concreto	2,46	150	0,50	1,75	21	0,35	5,00	85
Veneziana de correr em alumínio	2,46	150	0,50	1,75	21	0,35	5,00	85
Persiana integrada em PVC	2,46	150	0,50	1,75	21	0,35	5,00	85
Veneziana de madeira	2,46	150	0,50	1,75	21	0,35	5,00	85

4.2. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVE

A energia embutida nos materiais foi obtida da base de dados interacional (ICE, 2011). A presença de uma base de dados nacional fragmentada e incompleta não permitiu utilizar dados brasileiros para analisar a energia embutida das estratégias de projeto. Mesmo assim, a base de dados ICE (2011) foi comparada com os dados de energia

embutida presentes na literatura nacional para verificar se existem diferenças significativas entre os valores (Apêndice B). Da comparação dos dados observou-se que os dados nacionais não apresentam valores muito diferentes da base de dados ICE (2011). Na Tabela 13 são apresentados os valores de energia embutida dos principais materiais da construção civil utilizados no estudo de caso brasileiro presentes na base de dados ICE (2011).

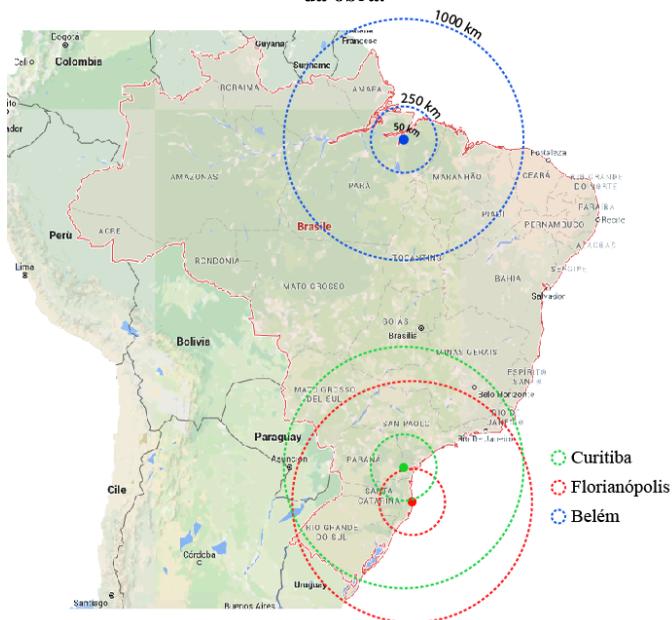
Tabela 13– Energia embutida ICE.

Material	Energia Embutida (MJ/kg)	
	ICE	
	Valor médio	Desvio Padrão
Alumínio anodizado	157,1	104,70
Poliestireno expandido	100,45	22,45
Cobre	69	37,50
Tinta acrílica	79,7	52,80
Aço	31,25	16,45
Vidro	20,05	9,15
Papel e celulose	27,35	13,95
Lã de rocha	16,75	6,75
Madeira MDF	10,55	1,55
Madeira laminada	10,65	3,15
Telha cerâmica	10,15	8,05
Telha de fibrocimento	8,6	3,50
Placa de gesso	4,05	2,55
Cimento comum	5,35	2,05
Blocos de cerâmica	4,3	4,10
Argamassa	1,55	0,95
Concreto	5,8	5,70
Blocos de concreto	5,8	5,70
Brita	0,125	0,08
Areia	0,225	0,18

Para determinar o consumo energético de transporte foi considerado o valor de 0,00150 MJ/kg.km, parecido com as pesquisas internacionais (GUIMARÃES et al., 2013; TAVARES, 2006). Este valor foi obtido considerando o transporte de material cerâmico com caminhão basculante, que para percorrer 3 km transportando 4 m³ de

argila, equivalente a 7200 kg, consome 1 litro de óleo diesel com poder calorífico na ordem de 42,25 MJ/kg (BRASIL, 2015) com uma densidade de 0,85 kg/dm³. Para determinar a distância de transporte da estratégia do fabricante até o local da obra foram consideradas, para as cidades brasileiras avaliadas, três distâncias diferentes de 50 km, 250 km e 1000 km para verificar qual pode ser a incidência da energia consumida no transporte no ciclo de vida. O consumo de energia foi calculado para os trajetos de ida e de volta do meio de transporte. A Figura 15 apresenta as três distâncias nas três cidades brasileiras.

Figura 15 – Distância do transporte da estratégia do fabricante até o local da obra.



Para avaliar a energia consumida para o transporte da mão de obra foi considerada, para cada dia de trabalho, uma distância igual a 50 km para a ida e 50 km para o retorno. Para avaliar a energia consumida para o transporte da mão de obra foi considerado um consumo de 2,08 MJ/km. Este valor foi obtido considerando que o transporte dos trabalhadores foi realizado através de um veículo com consumo de 1

litro de gasolina por 15 km percorridos (TCPO 14, 2012). O poder calorífico da gasolina considerado foi 43,5 MJ/kg (BRASIL, 2015) com uma densidade de 0,72 kg/dm³. Dependendo da estratégia de projeto instalada, o número e a qualificação dos trabalhadores foi diferente.

4.3. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVCO₂

Para a avaliação das emissões de dióxido de carbono foram consideradas as emissões de CO₂. No Brasil não existe uma base de dados sólida de emissões de CO₂ equivalente.

As emissões de CO₂ iniciais das estratégias de projeto foram obtidas de bases de dados nacional, como apresenta a Tabela 14. Para determinar as emissões devidas ao transporte das estratégias nas diferentes fases foi considerada uma única distância de 250 km. O valor de 0,000156 kgCO₂/kg.km foi utilizado para avaliar as emissões de CO₂ do caminhão basculante, utilizado na fase inicial de manutenção e desconstrução, para o transporte das estratégias, valor semelhante ao de pesquisas brasileiras (TRIANA, 2016; TAVARES, 2006). Este valor foi obtido considerando o transporte de material cerâmico com caminhão basculante, que para percorrer 3 km transportando 4 m³ de argila, equivalente a 7200 kg, consome 1 litro de óleo diesel com um fator de emissão de 3,37 kgCO₂/l (CBCS, 2015).

Para determinar as emissões de CO₂ devidas ao transporte rodoviário da mão de obra até a edificação onde foram instaladas as estratégias foi considerado o valor de 0,143 kgCO₂/km. Este valor foi obtido considerando que o transporte dos trabalhadores foi realizado por meio de um veículo com consumo de 1 litro de gasolina por 15 km percorridos (TCPO 14, 2012) e um fator de emissão 2,16 kgCO₂/l (CBCS, 2015).

O fator de conversão de 1 kWh de energia elétrica para emissões de CO₂ geradas na fase operacional foi de 0,1396 kgCO₂e/kWh (BRASIL, 2016).

Tabela 14 – Base de dados emissões iniciais de CO₂ no Brasil.

Material	Emissões de CO₂ Incorporadas (kgCO₂/kg)	Fonte
Alumínio anodizado	4,44	Tavares (2006)
Poliestireno expandido	2,70	Costa (2011)
Aço	1,85	Costa (2011)
Telha de fibrocimento	1,28	Tavares (2006)
Lã de rocha	0,83	Shmid e Habib (2015)
Vidro	0,80	Costa (2011)
Placa de gesso	0,77	Costa (2011)
Tinta acrílica	0,70	Tavares (2006)
Cimento comum	0,65	Costa (2011)
Madeira MDF	0,33	Costa (2011)
Madeira laminada	0,41	Costa (2011)
Concreto	0,40	Costa (2011)
Madeira MDF	0,33	Costa (2011)
Argamassa	0,19	Costa (2011)
Cortiça	0,19	Guerreiro (2012)
Blocos de concreto	0,18	Costa (2011)
Telha cerâmica	0,11	Costa (2011)
Blocos de cerâmica	0,11	Costa (2011)
Brita	0,09	Costa (2011)
Areia	0,09	Costa (2011)

4.4. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACCV

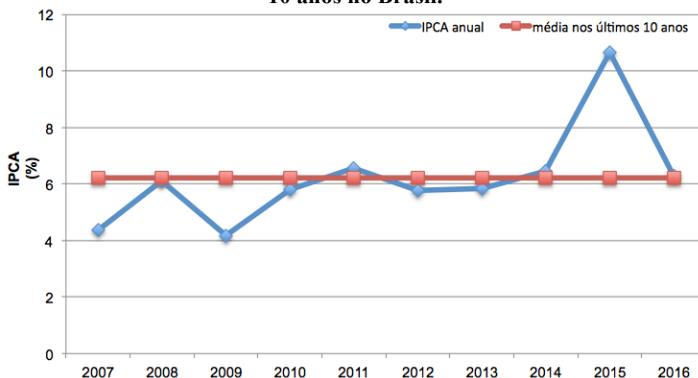
O valor econômico de cada estratégia foi obtido através do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da construção civil de março de 2016 (SINAPI, 2016).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL – 2015) apresenta as tarifas para as diferentes concessionárias do país para as diferentes tipologias de edificações. Em Curitiba, Florianópolis e Belém as tarifas utilizadas foram de 0,42 R\$/kWh, 0,44 R\$/kWh e 0,56 R\$/kWh, respectivamente. Estes valores foram utilizados para avaliar o custo da energia elétrica consumida na edificação. De acordo com a

energia consumida mensalmente foi aplicada a tarifa de consumo correspondente. As tarifas da ANEEL se referem ao valor atual do custo da energia elétrica. O método aqui apresentado avalia o consumo de energia de um edifício durante o ciclo de vida de 63 anos.

A variação do custo de energia, assim como para os custos futuros na fase de manutenção e desconstrução foi avaliada de acordo a inflação média dos Índices dos Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) dos últimos 10 anos no Brasil equivalente a 6,20% ao ano, como mostra a Figura 16 (IBGE, 2016).

Figura 16 – Inflação média dos índices de preços ao consumido dos últimos 10 anos no Brasil.



Fonte: adaptado IBGE, 2016

Como na avaliação do parâmetro de emissões, a única distância de 250 km foi considerada para o transporte das estratégias de projeto. Para avaliar o custo de transporte foram adotados os preços médio do óleo diesel e da gasolina nas três cidades brasileiras (PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS, 2015). Também neste caso, o custo futuro dos combustíveis foi corrigido pela inflação média dos produtos ao consumidor amplo dos últimos 10 anos (IBGE, 2016).

5. ESTUDO DE CASO ITALIANO

O estudo de caso avaliado na Itália é uma edificação multifamiliar de interesse social já construída na cidade de Milão. A edificação foi avaliada com uma vida útil de 100 anos (ISTAT, 2011) exclusivamente na cidade de Milão. A Tabela 15 apresenta as condições climáticas da cidade.

Tabela 15 – Condições climáticas de Milão.

Zona bioclimática -Cidade		ZCE- Milão
Coordenadas		45°27'50"N 9°11'25"E
Altitude (m)		122
Ano		TRY
Arquivo climático		1969
Temperatura bulbo seco (°C)	Média anual	12,4
Umidade relativa (%)		82,1
Radiação global (Wh/m²)		121,8

A Figura 17 apresenta a localização da cidade de Milão na zona climática E como indicado pela normativa D.P.R. 412 (1993) que subdivide o território italiano em seis zonas térmicas: de A, a mais quente, até F, a mais fria.

Como no estudo de caso brasileiro também para a edificação residencial multifamiliar na Itália foi utilizada a ferramenta *CCWorldWeatherGen – Climate Change World Weather File Generator* para avaliar o futuro desempenho termoenergético da edificação (JENTESH et al., 2008; JENTESH et al., 2013).

Figura 17 – Mapa da Itália com a localização da cidade de Milão.



Fonte: adaptado D.P.R. 412, 1993.

5.1. CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

A edificação residencial avaliada é uma habitação multifamiliar de interesse social realizada em 2012 na periferia de Milão em um área de 17000 m². O condomínio é constituído por quatro torres residenciais. Nesta pesquisa foi avaliado exclusivamente o primeiro bloco como apresentado nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Condomínio utilizado como estudo de caso na cidade de Milão.



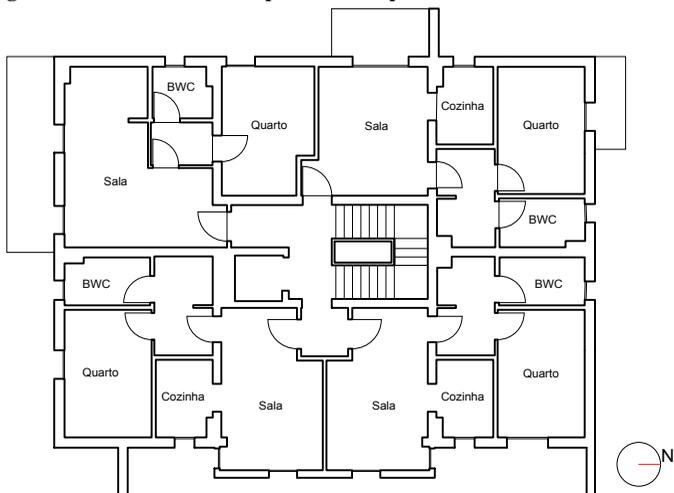
Fonte: Ferrario (2013).

Figura 19– Edificação utilizada como estudo de caso na cidade de Milão.



Fonte: <http://blog.urbanfile.org/2015/03/25/zona-quarto-cagnino-via-cenni-leco-villaggio-in-legno/> (2015).

O edifício possui dez pavimentos, sendo o último o ático e um piso subsolo onde são localizadas as garagens. Cada andar contém quatro apartamentos com dimensões e *layouts* parecidos. No total cada bloco é composto por 34 apartamentos. A Figura 20 apresenta a planta baixa do pavimento tipo do bloco avaliado na pesquisa.

Figura 20 – Planta baixa do pavimento tipo do estudo de caso em Milão

Fonte: Adaptado Cenni (2016).

O projeto foi classificado como nível A CENED (CENNI, 2016) segundo a certificação energética Italiana (DLGS. 311, 2006) conforme o antigo método em vigor até o ano de 2015. Isso equivale a consumo energético inferior a 24 kWh/m²/ano no inverno. A edificação apresenta uma estrutura em painéis X-Lam (*cross-laminated timber*). Os painéis de madeira laminada-colada cruzada, X-Lam, são placas estratificadas de grandes dimensões com desempenho estrutural. Tanto as paredes externas, quanto as paredes internas e a laje são em X-Lam. A cobertura é de tipo plana e é utilizável pelo usuário. Os painéis X-Lam também apresentam uma função estrutural e por este motivo as dimensões das paredes e das lajes mudam de acordo com o andar da edificação e as áreas entre as paredes estruturais. Assim, no nono andar a dimensão dos painéis é de 120 mm, no sétimo e no oitavo é de 140 mm, no sexto e quinto andar é de 160 mm, no quarto, terceiro e segundo de 180 mm e no piso térreo é de 200 mm. Da mesma forma as lajes em X-Lam apresentam dimensões diferentes de acordo com as cargas estruturais que incidem na laje. Assim os painéis X-Lam apresentam uma espessura de 200 mm para lajes com comprimento de até 5,80 m e de 230 mm para lajes com comprimento de até 6,70 m. O pé direito de cada andar é de

2,70 m. A Tabela 16 apresenta as características térmicas da edificação no sexto e quinto andar da edificação.

Tabela 16 – Propriedades térmicas do envelope do estudo de caso em Milão.

Tipo	Características	U (W/m²K)	Ct (kJ/m²K)	α (adm)
Cobertura	Impermeabilização (0,1 cm) Concreto para contrapiso (7,0 cm) Lã de rocha (11 cm) Painel X-lam (20 cm) Painel em gesso (1,5 cm)	0,20	354	0,30
Paredes Externas	Painel em fibrocimento (1,5cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Lã de rocha (11 cm) Painel X-lam (16 cm) Painel em gesso (1,5 cm)	0,21	203	0,30
Piso	Piso cerâmico(0,75 cm) Contrapiso (2,0 cm) Concreto para contrapiso (7,0 cm) Painel X-lam (20 cm) Painel em gesso (1,5 cm)	0,55	345	-

As janelas da edificação são em PVC de corte térmico com vidro duplo de baixa emissividade. As janelas são compostas por duas lâminas de vidros de 4 mm separadas por uma câmara de ar com gás argônio com uma transmitância térmica de 1,1 W/m²K e um fator solar de 80%. Todas as janelas dos apartamentos são de abrir e nos quartos apresentam veneziana integrada em PVC. Nas salas as janelas dispõem de brises em alumínio que permitem controlar a entrada de luz nos ambientes.

O sistema de aquecimento e resfriamento é constituído por bombas de calor que fornecem água quente e fria através de painéis radiantes colocados no piso de todos os apartamentos. O projeto não apresenta nenhum outro sistema de resfriamento ou calefação.

5.1.1. Configuração do modelo residencial para simulação

A avaliação do comportamento termoenergético do edifício foi realizada por meio do programa *EnergyPlus* versão 8.4. Após a coleta dos dados relativos às características geométricas e físicas da edificação, foi possível criar o modelo geométrico do edifício através do *plugin Open Studio*, dentro do programa *SketchUp*, que permite a inserção das coordenadas da edificação (Figura 21).

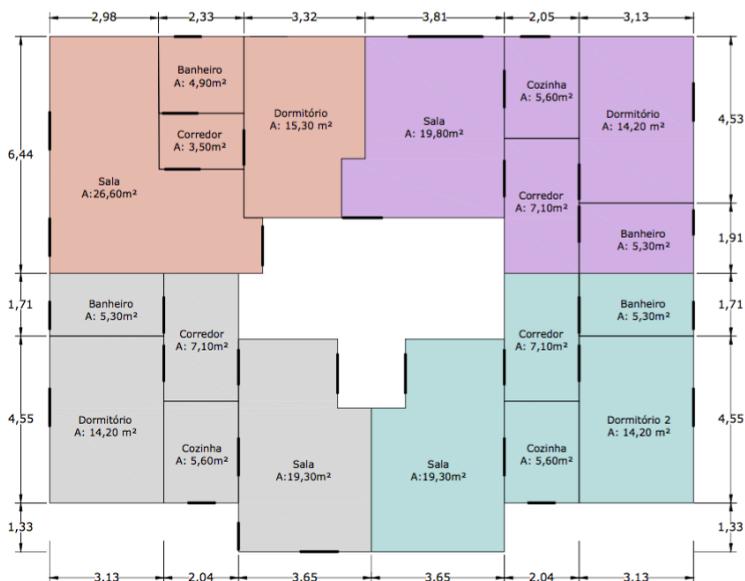
Os quatro apartamentos de cada andar da edificação são compostos por cinco ou seis zonas térmicas dependendo do apartamento avaliado. A Figura 22 apresenta os apartamentos do pavimento tipo com as cinco zonas térmicas de cada apartamento: sala, cozinha, banheiro, corredor e dormitório.

Figura 21– Modelo geométrico da edificação residencial multifamiliar.



Os quatro apartamentos de cada andar da edificação são compostos por cinco ou seis zonas térmicas dependendo do apartamento avaliado. A Figura 22 apresenta os apartamentos do pavimento tipo com as cinco zonas térmicas de cada apartamento: sala, cozinha, banheiro, corredor e dormitório.

Figura 22– Planta baixa do pavimento tipo com as zonas térmicas.



A configuração de todos os parâmetros para a simulação termoenergética da edificação multifamiliar segue o mesmo padrão utilizado no estudo de caso brasileiro.

A Tabela 17 apresenta os dados referentes ao padrão de uso e as cargas internas do estudo de caso italiano inseridos no programa *EnergyPlus*.

O modelo foi avaliado em dois diferentes cenários: o primeiro quando naturalmente ventilado e no segundo cenário quando condicionado artificialmente.

Na avaliação da edificação quando naturalmente ventilada, adotou-se como temperatura de *set point* 20°C de acordo com o *Decreto n. 6480* (2015). Os demais parâmetros utilizados para a avaliação da edificação quando ventilada naturalmente foram apresentados na Tabela 10.

Na avaliação da edificação quando condicionada artificialmente foi definida a temperatura de controle (*HVAC Template: Thermostat*) de 20°C para aquecimento e 26°C para resfriamento. O consumo para

aquecimento foi avaliado exclusivamente no período entre dia 15 de outubro até 15 de abril (Decreto n.6480, 2015).

O Quadro 3, no Capítulo 4, apresentada no estudo de caso brasileiro, resume os parâmetros e os objetos configurados no modelo do edifício residencial para as simulações através do programa *EnergyPlus*. Estes parâmetros foram utilizados da mesma forma no edifício com e sem as alterações de projeto.

Tabela 17 – Cargas internas e padrão de uso da edificação residencial na Itália.

Ambiente	Item	Especificação	Fonte	
Sala	Ocupação média	0,2 pessoas/m ²	UNI 10339:2 014	
	Densidade de carga interna	Iluminação		20 W/m ²
		Equipamentos		7,987· A-
		Atividade	0,0353· A ² ¹	
	Padrão de uso	Ocupação	24 h	UNI TS 11300- 1:2014
		Iluminação	24 h	
Equipamentos		24 h		
Dormitório	Ocupação média	0,1 pessoas/m ²	UNI 10339:2 014	
	Densidade de carga interna	Iluminação		20 W/m ²
		Equipamentos		7,987· A-
		Atividade	0,0353· A ² ¹	
	Padrão de uso	Ocupação	24 h	UNI TS 11300- 1:2014
		Iluminação	24 h	
Equipamentos		24 h		

5.1.2. Estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso italiano

Para a aplicação do método no estudo de caso italiano, diferentemente do estudo de caso no Brasil, decidiu-se analisar mais de uma estratégia de projeto ao mesmo tempo, modificando o envelope da edificação assim como o seu sistema estrutural. O objetivo foi avaliar diferentes soluções de envoltória na edificação multifamiliar mantendo o

¹ A formula utilizada para definir a carga interna dos equipamentos e das atividades dos usuários é baseada na superfície útil dos ambientes internos A.

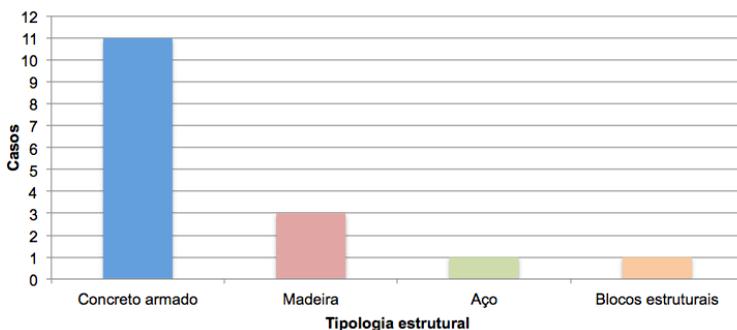
mesmo valor de transmitância térmica do caso base. Para escolher de forma mais adequada as diferentes soluções de estrutura e envelope foram analisados alguns projetos de edificações multifamiliares de interesse social na Itália (Tabela 18).

Tabela 18– Projetos de edificações de interesse social multifamiliar na Itália.

Projeto	Cidade	Ano de construção	Características construtivas
BORGO SOSTENIBILE	Milão	2015	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
4 PALAZZINE	Brescia	2012	Estrutura em madeira - <i>Cappotto</i>
CASE A PISCINOLA	Nápoles	2012	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
SOCIAL HOUSING CHERI	Chieri	2012	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
CASA CREMA	Crema	2011	Estrutura em concreto armado - Blocos celular - <i>Cappotto</i>
CASANOVA EA2	Bolzano	2011	Estrutura em concreto armado - <i>Cappotto</i>
SOCIAL HOUSING TREVISO	Treviso	2011	Estrutura em madeira - Painéis pré-fabricados
VERSO CASA	Bérgamo	2011	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
LOTTO 4 DARSENA	Ravenna	2011	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
BIRD	Brescia	2010	Estrutura em aço- Paredes leves
COLLE HOUSING	Colle Val D'Elsa	2010	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
GIUSTINIANO IMPERATORE	Roma	2009	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
VILLA FASTIGGI	Bérgamo	2009	Estrutura em Blocos estruturais - Reboco isolante
PROGETTO C.A.S.E.	L'Aquila	2009	Estrutura em madeira - <i>Cappotto</i>
MARIO PETTOELLO SOCIAL HOUSING	Verona	2006	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>
HOUSING RESIA 1	Bolzano	2004	Estrutura em concreto armado - Blocos cerâmicos - <i>Cappotto</i>

Desta análise percebeu-se que a maioria dos projetos utilizou a estrutura de concreto armado, seguida pela estrutura de madeira (Figura 23). Também no tipo de isolamento térmico o mais utilizado foi o sistema a *cappotto*, ou seja a solução que localiza o isolamento térmico na parte externa da parede antes do reboco externo. As paredes externas são compostas, na maioria dos casos analisados, por blocos cerâmicos, sendo este um material econômico e com boas características de durabilidade e térmicas.

Figura 23– Estrutura portante nos projetos de edificações multifamiliares de interesse social.



Através desta análise decidiu-se avaliar três diferentes soluções de sistemas estruturarias no estudo de caso em Milão: em X-lam, do caso base, em concreto armado e em aço. Para as três soluções estruturais foram utilizados diferentes alternativas de paredes externas e isolamento térmico. Nas diferentes soluções avaliadas, foi considerada a mesma transmitância térmica na envoltória. A Tabela 19 apresenta as diferentes soluções projetuais avaliadas no estudo de caso na Itália.

Enquanto nas soluções com estrutura em X-Lam e aço o único material da envoltória alterado foi o tipo de isolante térmico, na solução estrutural em concreto armado também a tipologia de parede externa foi modificada, resultando em dez diferentes estratégias projetuais. As quantidades dos diferentes materiais utilizados nas soluções projetuais, assim como o estudo das diferentes estruturas e o seus dimensionamentos são apresentados no Apêndice C.

Tabela 19 – Estratégias de projeto no estudo de caso na Itália.

Estrutura	Caso	Paredes Externas	Isolante nas Paredes Externas e Cobertura	Paredes Internas
X-Lam	1 - Base	X-Lam	Lã de rocha (11 cm)	X-Lam (12 cm) – Revestimento em gesso
	2	X-Lam	XPS (10 cm)	X-Lam (12 cm) – Revestimento em gesso
	3	X-Lam	EPS (12 cm)	X-Lam (12 cm) – Revestimento em gesso
	4	X-Lam	Fibra de madeira (12 cm)	X-Lam (12 cm) – Revestimento em gesso
Concreto Armado	5	Parede dupla em tijolos cerâmicos (12 e 8 cm)	Lã de rocha (12 cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	6	Parede dupla em tijolos cerâmicos (12 e 8 cm)	XPS (11 cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	7	Parede dupla em tijolos cerâmicos (12 e 8 cm)	EPS (13 cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	8	Parede dupla em tijolos cerâmicos (12 e 8 cm)	Fibra de madeira (14 cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	9	Parede em tijolo cerâmico furado (25 cm)	<i>Cappotto</i> : lã de rocha (9 cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	10	Parede em tijolo cerâmico furado (25 cm)	<i>Cappotto</i> : XPS (8cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	11	Parede em tijolo cerâmico furado (25 cm)	<i>Cappotto</i> : EPS (10 cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	12	Parede em tijolo cerâmico furado (25 cm)	<i>Cappotto</i> : Fibra de madeira (10cm)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	13	Blocos em concreto celular (30cm)	Lã de rocha (somente na cobertura)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	14	Tijolos cerâmicos <i>rettificati</i> (45 cm)	Lã de rocha (somente na cobertura)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
Aço	15	Parede leve: painel em gesso (int.) e painel em fibrocimento (ext.)	Lã de rocha (15 cm)	Parede dupla em gesso e camada de ar (10 cm)
	16	Parede leve: painel em gesso (int.) e painel em fibrocimento (ext.)	XPS (13 cm)	Parede dupla em gesso e camada de ar (10 cm)
	17	Parede leve: painel em gesso (int.) e painel em fibrocimento (ext.)	EPS (16 cm)	Parede dupla em gesso e camada de ar (10 cm)
	18	Parede leve: painel em gesso (int.) e painel em fibrocimento (ext.)	Fibra de madeira (17 cm)	Parede dupla em gesso e camada de ar (10 cm)

No total foram avaliadas 18 diferentes soluções projetuais, sendo a primeira o estudo de caso base da edificação. Para facilitar a análise do ciclo de vida da edificação nos quatro parâmetros, decidiu-se avaliar as 18 alternativas unicamente nas suas respectivas energias embutidas. Assim, foram escolhidas as duas alternativas que obtiveram o melhor e o pior desempenho na fase inicial do ciclo de vida energético, em cada solução estrutural. Estas seis alternativas foram avaliadas no ciclo de vida nos quatro parâmetros utilizados para escolher a melhor solução de projeto.

Para cada caso foi necessário modificar o modelo da edificação elaborado no programa de simulação computacional *EnergyPlus*, inserindo as características geométricas e físicas das diferentes estratégias para a avaliação da energia operacional e as horas de conforto.

5.2. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVE

Para realizar a ACVE das diferentes estratégias de projeto apresentadas anteriormente, três bases de dados foram comparadas e utilizadas na fase inicial do ciclo de vida. As três bases de dados são: ICE (2011), Ecoinvent 3 (2016) e as certificações EPD dos diferentes materiais. Os dados relativos às certificações EPD representam a média dos valores de diferentes certificações presentes no mercado (Apêndice D). As três bases de dados forneceram os valores de energia embutida dos materiais.

A Tabela 20 apresenta a comparação das diferentes bases de dados dos principais materiais utilizados no estudo de caso. Além das três bases de dados são apresentados também o valor médio e o desvio padrão de cada material. Estes valores foram utilizados para analisar a influência das diferentes bases de dados nos resultados finais. Observa-se que nos materiais avaliados os valores de energia embutida apresentaram diferenças significativas entre as três bases de dados. Na energia embutida o aço resultou ser o material com a maior variação, igual a 100%, enquanto o isolante térmico em EPS apresentou, nas diferentes bases de dados, valores parecidos com uma variação de aproximadamente 20%.

Tabela 20 – Base de dados na energia embutida para o estudo de caso na Itália.

Material	Energia Embutida (MJ/kg)				
	ICE	EPD	Ecoinvent	Média	Desvio Padrão
Alumínio	155,0	146,0	129,0	143,3	13,2
EPS	88,6	92,0	106,4	95,7	9,4
XPS	-	88,4	91,0	89,7	1,8
Aço	20,1	11,19	22,4	17,9	5,9
Fibra de madeira	20,0	36,4	23,9	26,8	8,6
Lã de rocha	16,8	27,1	16,6	20,2	6,0
X-Lam	16,0	27,5	29,6	25,8	8,6
Fibrocimento	10,4	8,8	8,5	9,2	1,0
Placa de gesso	6,7	5,06	1,7	4,5	2,5
Tijolos cerâmicos	3,0	4,2	2,9	3,4	0,7
Concreto armado	1,9	-	-	1,9	-
Argamassa	1,1	0,8	1,5	1,1	0,4
Concreto	1,0	1,7	1,4	1,4	0,4
Blocos de concreto	0,7	3,6	0,9	1,8	1,6

Para determinar o consumo energético de transporte foi considerado um valor de 0,00134 MJ/kg.km, semelhante ao valor observado no estudo de caso brasileiro. Este valor foi obtido considerando um caminhão basculante com capacidade de transporte de 8000 kg de material, com um consumo médio de 4,7 km/l (MIT, 2011) consome 1 litro de óleo diesel com poder calorífico na ordem de 42,67 MJ/kg (ITÁLIA, 2007) com uma densidade de 0,85 kg/dm³. Para determinar a distância de transporte da estratégia do fabricante até o local da obra foram consideradas, como no estudo de caso brasileiro, três distâncias diferentes de 50 km, 250 km e 1000 km para verificar a incidência da energia consumida no transporte no do ciclo de vida (Figura 24). O consumo de energia foi calculado para os percursos de ida e de volta do meio de transporte.

Tabela 21 – Vida útil dos materiais de uma edificação na literatura internacional.

Material/ Componente	Vida útil (Anos)								Média
	Monteiro et al. (2016)	Takano et al. (2015)	Atmaca e Atmaca (2015)	Rauf e Crowford (2013)	Lewandowska et al. (2013)	Mithraratne Vale (2004)	Inter NACHI (2009)	Scheuer (2003)	
Estrutura de concreto armado	-	-	-	150	-	100	100	-	115
Estrutura de aço	-	-	-	150	-	100	100	75	131
Estrutura de madeira	-	-	-	150	100	100	100	-	112
Isolantes térmicos	-	-	-	-	50	100	100	75	81
Esquadrias, portas e janelas	-	50	20	-	-	60	15-30	40	39
Telha	-	-	-	-	-	40	70	-	55
Tijolos cerâmicos	-	50	25	150	100	100	-	-	85
Telha de fibrocimento	-	50	-	-	-	-	-	-	50
Painéis fibrocimento	-	50	-	-	-	50	100	-	67
Piso cerâmico	-	-	15	-	20	30	-	30	24
Painéis de madeira	-	-	-	-	-	30	-	75	52
Reboco	25	-	-	-	-	-	-	-	25
Fachada em tijolos	25	-	-	-	-	-	-	-	25
Pinturas	10	-	8	10	25	8	10	5	11
Gesso	-	50	-	-	50	100	-	-	67

Como mostram as pesquisas internacionais (MONTEIRO et al., 2016; RAUF; CROWFORD, 2013; MITHRARATNE; VALE, 2004), a vida útil do mesmo material de uma edificação varia. Isso pode depender de diversos fatores, fontes ou normas utilizadas para identificar a vida dos edifícios (TAKANO et al., 2015) ou de uma pesquisa mais aprofundada que analisa as condições climáticas onde o edifício se localiza e a consequente degradação dos materiais (LEWANDOWSKA et al., 2013). Na maioria dos casos não é especificada a fonte ou a modalidade de avaliação da vida útil dos materiais da construção civil. Nesta tese a média da vida útil obtida das

diferentes fontes internacionais foi utilizada para a substituição das diferentes estratégias de projeto no estudo de caso italiano.

Nesta pesquisa também foi avaliado, a título informativo, o potencial de reuso dos diferentes materiais presentes nas estratégias de projeto aplicadas na edificação. Esta fase, como observado também pela normas europeias (EN 15804, 2012; EN 15978, 2011), é de difícil avaliação e previsão e por esta razão não é considerada fundamental. Para avaliar a fase de reuso dos materiais da construção foram utilizadas duas bases de dados: Ecoinvent 3 (2016) e as certificações EPD dos diferentes materiais. As bases de dados fornecem os valores de energia gerada para reutilizar ou reciclar o material avaliado. Na Tabela 22 são apresentados os valores das duas bases de dados com o valor médio e o desvio padrão. Como pode-se observar nem todas as certificações EPD avaliam a fase de reuso nos materiais da construção civil. Os dados mostram que a fase de reciclagem pode reduzir os impactos dos diferentes materiais utilizados na construção civil.

Tabela 22 – Base de dados na fase de reuso para o estudo de caso na Itália.

Material	Energia de Reuso (MJ/kg)			
	EPD	Ecoinvent	Média	Desvio Padrão
Lã de rocha	-2,21	0,64	-0,785	2,01
EPS	-29,13	-30,49	-29,81	0,96
XPS	-22,12	-30,49	-17,66	5,92
Fibra de madeira	-12,12	-23,2	0,086	7,84
Concreto armado	-	0,086	0,086	-
Tijolos cerâmicos	-	0,06	0,06	-
Blocos de concreto	-	0,06	0,06	-
X-Lam	-15,60	-0,56	-8,08	-15,60
Alumínio	-	-194,3	-194,3	-
Fibrocimento	-	0,05	0,05	-
Argamassa	-	0,07	0,07	-
Placa de Gesso	-0,3	0,05	-0,125	0,25
Concreto	-	0,07	0,07	-
Aço	-	-16,1	-16,1	-

5.3. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACVCO₂

Diferentemente do estudo de caso brasileiro, na edificação residencial multifamiliar italiana, para a avaliação das emissões de dióxido de carbono foram consideradas as emissões de CO₂ equivalente, sendo um parâmetro mais completo em comparação com as emissões de CO₂, devido à disponibilidade de dados europeus.

Como para a avaliação da ACVE, também na avaliação das emissões de CO₂ equivalente, as mesmas três bases de dados foram comparadas e utilizadas na fase inicial do ciclo de vida. Os dados relativos as certificações EPD representam a média dos valores de diferentes certificações presentes no mercado (Apêndice C). As três diferentes bases de dados forneceram os valores de emissões iniciais dos materiais. A Tabela 23 apresenta a comparação das diferentes bases de dados dos principais materiais utilizados no estudo de caso. Além das três bases de dados são apresentados também o valor médio e o desvio padrão de cada material. Observa-se, também nos dados de emissões de CO₂ equivalente, que os valores de emissões apresentaram diferenças significativas entre as três bases de dados. No valor das emissões de CO₂ equivalente o X-Lam resultou ser o material com a maior variação, equivalente a 191%, enquanto o isolante térmico em lã de rocha apresentou, nas diferentes bases de dados, valores parecidos com uma variação de 18%. Esta análise demonstrou que a escolha da base de dados pode afetar sensivelmente os resultados finais em uma ACV. Por esta razão é de fundamental importância aprimorar a escolha da base de dados tendo em conta todos os fatores que podem influenciar a avaliação.

Tabela 23 – Base de dados emissões iniciais de CO₂e no estudo de caso italiano.

Material	Emissões de CO ₂ equivalente fase inicial (kgCO ₂ e/kg)				
	ICE	EPD	Ecoinvent	Média	Desvio Padrão
Alumínio	9,16	7,7	9,96	8,94	1,15
EPS	3,29	3,32	4,61	3,74	0,75
XPS	-	2,9	3,51	3,21	0,43
Aço	1,46	0,76	2,04	1,42	0,64
Lã de rocha	1,12	1,30	1,36	1,26	0,12
X-Lam	1,09	-1,5	0,75	0,21	1,24
Fibra de madeira	0,98	-0,93	1,93	0,66	1,46
Fibrocimento	0,9	0,5	0,61	0,67	0,21
Placa de Gesso	0,39	0,25	0,22	0,29	0,09
Tijolos cerâmicos	0,24	0,3	0,25	0,26	0,03
Concreto armado	0,19	-	-	0,19	-
Argamassa	0,18	0,09	0,19	0,15	0,06
Concreto	0,16	0,23	0,22	0,20	0,04
Blocos de concreto	0,09	0,41	0,11	0,20	0,18

Para determinar as emissões geradas para o transporte das estratégias do fabricante até o local da obra foram consideradas novamente as três distâncias de 50 km, 250 km e 1000km (Figura 25). Para determinar as emissões de CO₂ do caminhão basculante, utilizado na fase inicial, de manutenção e desconstrução, para o transporte das estratégias de projeto foi utilizado o valor de 0,000081 kgCO₂e/kg.km. Este valor foi obtido considerando um caminhão basculante, que para percorrer 4,7 km transportando 8000 kg de material, consome 1 litro de óleo diesel com um fator de emissão de 3,02 kgCO₂e/kg (SIRENA, 2015).

Para determinar as emissões de CO₂ devidas ao transporte rodoviário da mão de obra até a edificação onde serão instaladas as estratégias de projeto foi considerado o valor de 0,084 kgCO₂e/km. Este valor foi obtido considerando que o transporte dos trabalhadores foi realizado por meio de um veículo com consumo de 1 litro de gasolina

por 15 km percorridos (TCPO 14, 2012) e um fator de emissão 2,93 kgCO₂ e/kg (SIRENA, 2015).

O fator de conversão de 1 kWh de energia elétrica para emissões de CO₂ geradas na fase operacional foi de 0,3524 kgCO₂e/kWh (ENEA, 2013).

Também na avaliação das emissões geradas, sempre a título informativo, foi avaliado o potencial de reuso dos diferentes materiais presentes nas estratégias de projeto aplicadas na edificação. Na Tabela 24 são apresentados os valores das duas bases de dados com o valor médio e o desvio padrão.

Tabela 24 – Base de dados na fase de reuso para o estudo de caso na Itália.

Material	Emissões de CO ₂ equivalente de Reuso (kgCO ₂ e/kg)			
	EPD	Ecoinvent	Média	Desvio Padrão
Lã de rocha	-0,13	0,03	-0,05	0,11
EPS	-1,74	-1,64	-1,69	0,07
XPS	-1,06	-1,64	-1,35	0,41
Fibra de madeira	-1,48	-0,54	-1,01	0,66
Concreto armado	-	0,006	0,006	-
Tijolos cerâmicos	-	0,003	0,003	-
Blocos de concreto	-	0,003	0,003	-
X-Lam	-0,10	-0,04	-0,07	0,04
Alumínio	-	-18,8	-18,8	-
Fibrocimento	-	0,003	0,003	-
Argamassa	-	0,004	0,004	-
Placa de Gesso	-0,02	0,003	-0,008	0,01
Concreto	-	0,004	0,004	-
Aço	-	-1,7	-1,7	-

5.4. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AVALIAÇÃO DA ACCV

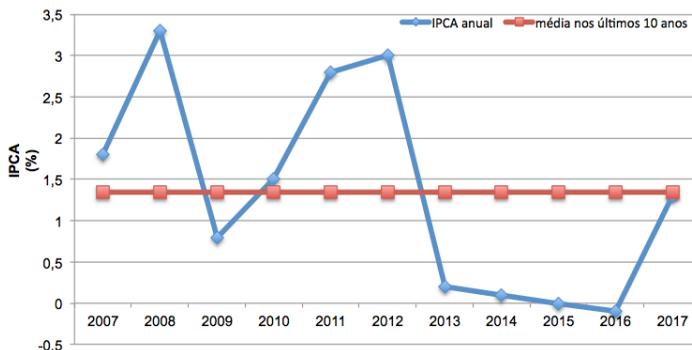
Enfim, o último parâmetro avaliado, também no estudo de caso italiano, foi o parâmetro econômico financeiro.

O valor em euros (€) de cada estratégia foi estimado a partir dos preços obtidos da câmara de comércio de Milão do segundo semestre de 2016 (CAMERA DI COMMERCIO DI MILANO, 2016).

O custo da energia para uma família típica na Itália, com consumo médio de 2700 kWh ao ano, é de 0,1863 €/kWh (AUTORITA ENERGIA, 2017).

A variação do custo de energia, assim como para os custos futuros na fase de manutenção e desconstrução foi avaliada de acordo a inflação média dos índices dos preços ao consumidor amplo (IPCA) dos últimos 10 anos na Itália equivalente a 1,34% ao ano, como mostra a Figura 25 (ISTAT, 2017).

Figura 25 – Inflação média dos índices de preços ao consumidor dos últimos 10 anos na Itália.



Fonte: adaptado ISTAT, 2017

Para avaliar o custo de transporte foram adotados os preços médios do óleo diesel e da gasolina na cidade de Milão que equivale a 1,305 €/l e 1,445 €/l, respectivamente, para óleo diesel e gasolina (PREZZI COMBUSTIBILI, 2017). Também neste caso, o custo futuro dos combustíveis foi corrigido pela inflação média dos produtos ao consumidor dos últimos 10 anos (ISTAT, 2017).

6. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação do método proposto no estudo de caso brasileiro e no estudo de caso italiano.

6.1. ESTUDO DE CASO NO BRASIL

Primeiramente foi avaliada a edificação residencial unifamiliar nas três cidades brasileiras. A avaliação das condições climáticas futuras nessas três cidades permitiu identificar quais parâmetros climáticos influenciariam o desempenho da edificação.

Para facilitar a leitura dos resultados das estratégias de projeto no estudo de caso, serão apresentados os gráficos exclusivamente da cidade de Florianópolis, comparando os resultados com as outras duas cidades brasileiras. Os demais gráficos são apresentados no Apêndice D.

Os resultados do parâmetro de conforto, obtidos através das horas de conforto térmico com e sem as estratégias de projeto, serão os primeiros a serem apresentados.

O segundo parâmetro analisado foi o ciclo de vida energético das estratégias de projeto.

O terceiro parâmetro analisado foi a emissão de CO₂ gerada pelo uso das diferentes estratégias de projeto no ciclo de vida. Dessa forma foi possível definir não somente a estratégia energeticamente mais eficiente no ciclo de vida, mas também a menos poluente em termos de emissões de dióxido de carbono.

Por fim, através da Análise de Custo do Ciclo de Vida foi analisado o custo financeiro das estratégias de projeto ao longo da vida útil da edificação. O custo das estratégias, assim como a mão de obra, foi diferente de acordo com a cidade na qual a edificação é avaliada.

Através do método de tomada de decisão multicritério foi possível definir as estratégias mais adequadas para cada cidade.

6.1.1. Análise das condições climáticas futuras

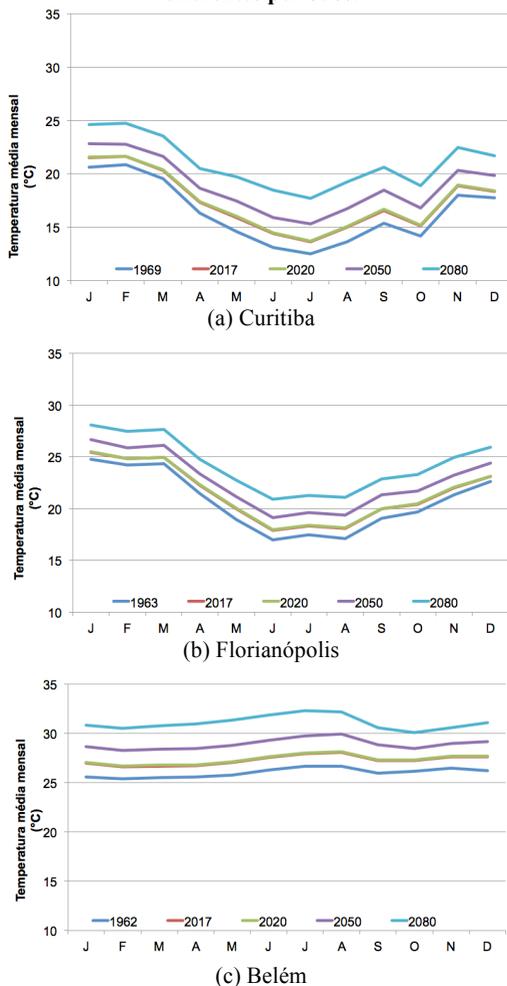
O desempenho térmico e energético das edificações está relacionado às condições climáticas do lugar. Através da análise das condições climáticas futuras das três cidades brasileiras foi possível

verificar quais fatores e de que forma influenciam o desempenho das edificações.

Nesta análise foram avaliadas exclusivamente as médias mensais da temperatura, da umidade relativa e da radiação global horizontal em cinco diferentes períodos: o ano do arquivo climático, 2017, 2020, 2050 e 2080. Os anos 2017 e 2080 correspondem ao primeiro e ao último ano de vida da edificação residencial avaliada.

A Figura 26 apresenta a comparação da temperatura média mensal em Curitiba, Florianópolis e Belém, nos cinco diferentes períodos. Percebeu-se que a temperatura média mensal aumentará nos próximos anos nas três cidades. Assim, enquanto a variação de temperatura entre 2017 e 2020 em Curitiba foi mínima ($0,06^{\circ}\text{C}$), em 2050 e 2080 a temperatura média anual aumentará $1,5^{\circ}\text{C}$ e $3,6^{\circ}\text{C}$, respectivamente, em comparação com 2017. Em Florianópolis o aumento da temperatura foi de $0,04^{\circ}\text{C}$ entre 2017 e 2020, enquanto em 2050 e 2080 a temperatura média anual aumentará $1,2^{\circ}\text{C}$ e $2,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente, em comparação com 2017. Enfim, em Belém o aumento da temperatura foi de $0,08^{\circ}\text{C}$ entre 2017 e 2020, enquanto em 2050 e 2080 a temperatura média anual aumentará $1,6^{\circ}\text{C}$ e $3,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente, em comparação com 2017.

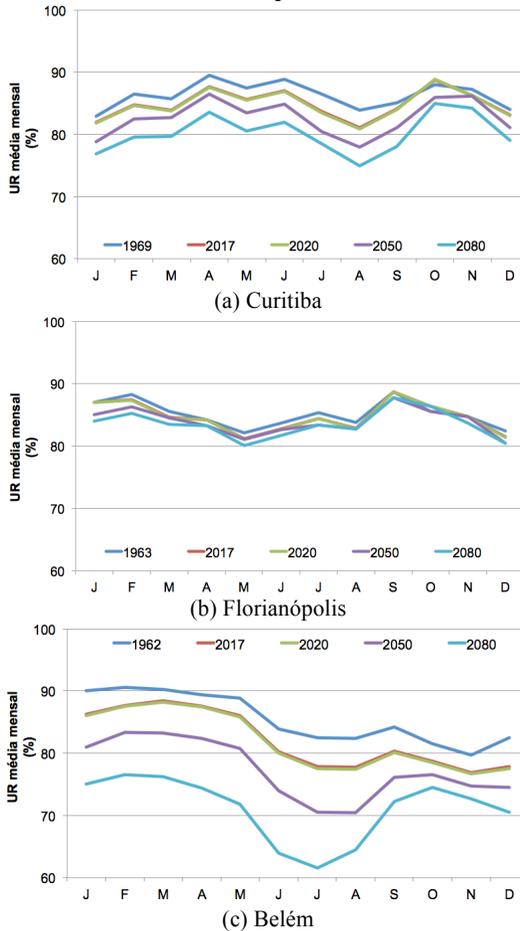
Figura 26– Temperatura média mensal nas três cidades brasileiras nos diferentes períodos.



A Figura 27 apresenta a comparação da umidade relativa média mensal nas três cidades do Brasil nos cinco períodos. Percebeu-se que, ao contrário da temperatura, a umidade relativa diminuirá nos próximos anos. Esta redução foi mais perceptível nas próximas décadas quando,

em 2080, a umidade média anual diminuirá 4,6%, 1,1% e 10,9%, respectivamente, nas cidades de Curitiba, Florianópolis e Belém em comparação com a umidade média anual atual.

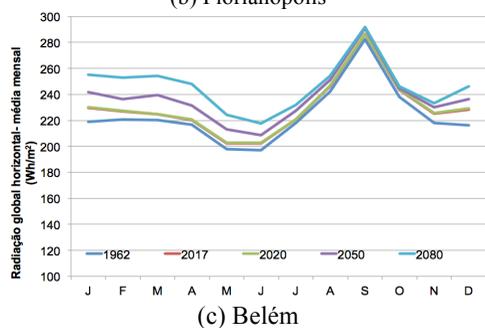
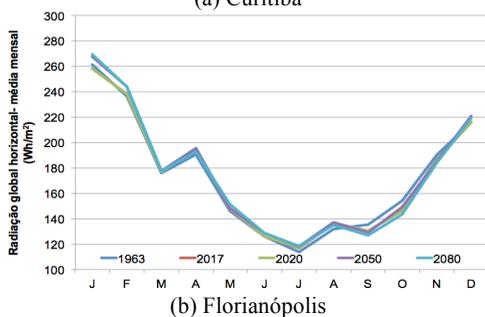
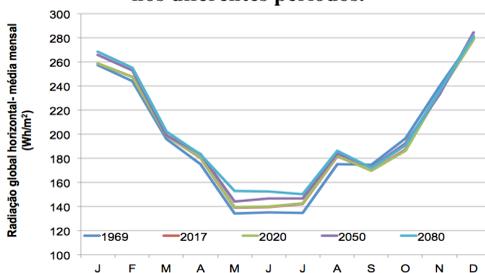
Figura 27 - Umidade média mensal nas três cidades brasileiras nos diferentes períodos.



Por fim, a Figura 28 apresenta a comparação da radiação global horizontal média mensal nas três cidades nos cinco períodos. Neste caso

a radiação global nos próximos 60 anos terá aumento médio, entre 2017 e 2080, de $3,9 \text{ Wh/m}^2$, $1,4 \text{ Wh/m}^2$ e $16,6 \text{ Wh/m}^2$, respectivamente, nas cidades de Curitiba, Florianópolis e Belém. Além disso, observaram-se picos de radiação em alguns meses do ano nos cinco períodos em Florianópolis e Belém. Isso pode ser devido a erros no arquivo climático original utilizado na avaliação.

Figura 28 - Radiação global horizontal mensal nas três cidades brasileiras nos diferentes períodos.



A análise dos arquivos climáticos futuros mostrou os efeitos das mudanças climáticas nas diversas cidades brasileiras. O principal destaque foi o aumento da temperatura do ar nas próximas décadas. Ao mesmo tempo houve diminuição da umidade relativa e aumento da radiação global em comparação com as atuais condições climáticas. Estas mudanças terão efeitos significativos também no desempenho energético e no conforto térmico dos moradores nas edificações.

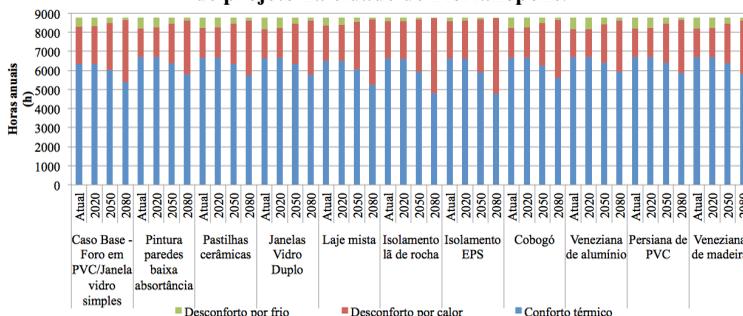
A comparação entre os dados climáticos futuros e os dados presentes nos atuais arquivos climáticos mostrou a importância da atualização de tais arquivos para fins de simulações do comportamento termoenergético das edificações. Para obtenção de resultados mais próximos da realidade é fundamental que os arquivos climáticos, utilizados nas simulações, sejam sempre atualizados para que possam refletir as condições climáticas reais.

6.1.2. Conforto térmico

Para obter as horas de conforto dos moradores da edificação com as diferentes estratégias, a edificação foi simulada em condições de ventilação natural durante o ano todo. Também neste caso as mudanças climáticas foram avaliadas ao longo da vida útil da edificação. A avaliação foi realizada nas três cidades brasileiras.

A Figura 29 apresenta as horas de conforto e desconforto do usuário na edificação residencial no caso base e com as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.

Figura 29– Horas de conforto do usuário da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.



No caso base a edificação foi avaliada com as estratégias das janelas com vidro simples e forro de PVC. Os diferentes casos da edificação foram analisados considerando as mudanças climáticas futuras. Por isso foram avaliados em quatro diferentes períodos: atual (2017), 2020, 2050 e 2080. O ano de 2080 coincide com o último ano de vida da edificação, considerando vida útil de 63 anos.

Os resultados apresentados demonstraram que, em todos os casos avaliados, as horas de conforto diminuirão com o passar dos anos. Na edificação com as estratégias de isolamento térmico com EPS e lã de rocha, até 2080, as horas de conforto diminuirão 28%, enquanto com as estratégias de sombreamento (veneziana de madeira e alumínio e persiana de PVC) a redução de horas de conforto será de 13%, em comparação com as horas de conforto atuais. A redução das horas de conforto se deve ao aumento das horas de desconforto por calor que até 2080 representarão, dependendo do caso, de 40% a 60% das horas anuais. A edificação com o melhor desempenho de conforto térmico por calor em 2080 foi a edificação com venezianas de alumínio (2769 horas), enquanto que a edificação com isolamento térmico com EPS obteve o pior desempenho (3957 horas). Em comparação com as horas de desconforto por calor atuais, em 2080 aumentarão de 70% a 102%. O caso base da edificação foi o caso onde o aumento de horas de desconforto por calor foi menor (+1341 horas), enquanto que a edificação com isolamento térmico com lã de rocha foi a que teve a maior variação (+2003 horas).

Por outro lado pôde-se observar que houve uma diminuição nas horas de desconforto por frio em todos os casos avaliados. Até 2080, as horas de desconforto por frio representaram menos de 2% das horas anuais nos diferentes casos. A edificação com o menor número de horas de desconforto por frio foi a edificação com isolamento térmico com EPS (35 horas) enquanto que a edificação com veneziana de madeira obteve o maior número de horas de desconforto por frio (153 horas).

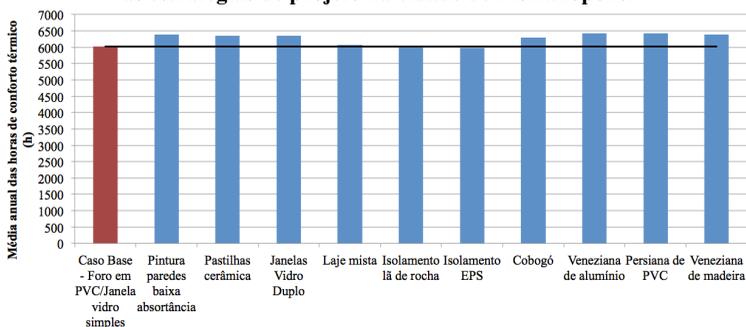
A Figura 30 apresenta as horas de conforto médias anuais obtidas com as diferentes estratégias de projeto nos 63 anos de vida da edificação. O caso base da edificação foi a referência de comparação para os outros casos da edificação com a aplicação da estratégia de projeto. Percebeu-se que somente as estratégias com isolamento térmico não permitiram melhorar o desempenho térmico da edificação quando naturalmente ventilada, apresentando menor número de horas de conforto. As outras estratégias de projeto permitiram melhorar as condições de conforto térmico do usuário. A veneziana de alumínio foi a

estratégia que mais aumentou (6,8%) as horas de conforto ao longo da vida útil da edificação em comparação com o caso base. Entre as outras estratégias, a edificação com a laje mista apresentou desempenho semelhante ao caso base, aumentando as horas de conforto em 0,9%.

Em Curitiba, os resultados obtidos foram diferentes em comparação com os resultados na cidade de Florianópolis. Todas as estratégias de projeto permitiram aumentar as horas de conforto térmico na edificação quando naturalmente ventilada. As estratégias com o melhor desempenho foram o isolamento térmico com lã de rocha e EPS, pois permitiram aumentar as horas de conforto em 15,4% e 15,7% ao ano, respectivamente (Figura 65, Apêndice D).

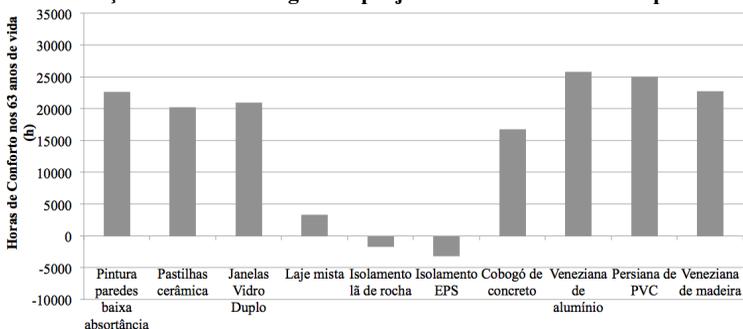
Em Belém, as estratégias de isolamento térmico e da laje mista não permitiram aumentar as horas de conforto térmico na edificação quando ventilada naturalmente. Em uma cidade como Belém, onde as condições climáticas de extremo calor são o fator principal, o uso da ventilação natural nas edificações não permite alcançar condições de conforto interno adequadas para os moradores. Em geral os resultados mostraram que a estratégia que permitiu alcançar melhor conforto térmico dos moradores na edificação foi a pintura das paredes externas com baixa absorvância, com 19,8% de horas de conforto a mais durante o ano. Também as estratégias de sombreamento das aberturas permitiram melhorar o conforto dos usuário. Como demonstrado em pesquisas internacionais os elementos de sombreamento são uma estratégia eficaz em climas quentes e com elevada radiação solar direta (INVIDIATA; GHISI, 2015; KIM et al., 2012; JABER; AJIB, 2011). As horas de conforto térmico do usuário na edificação em Belém, com e sem as estratégias de projeto, resultaram inferiores a 40% ao ano, demonstrando a necessidade da utilização de sistemas de ar-condicionado para melhorar o conforto térmico do usuário (Figura 66, Apêndice D).

Figura 30 – Média anual das horas de conforto térmico na edificação com as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.



A Figura 31 apresenta as horas de conforto totais nos 63 anos de vida na edificação com as diferentes estratégias de projeto em comparação com o caso base na cidade de Florianópolis. Como apresentado anteriormente, a veneziana de alumínio obteve o melhor desempenho, com incremento de 25750 horas de conforto, enquanto o isolamento com EPS obteve o pior resultado com redução de 3150 horas de conforto, em comparação com o caso base da edificação.

Figura 31 – Balanço das horas de conforto nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.



Em Curitiba, as estratégias de isolamento térmico permitiram aumentar as horas de conforto em mais de 30000 horas na vida útil da edificação. O isolamento térmico com EPS obteve o melhor desempenho, com incremento de 33102 horas de conforto, enquanto as

janelas com vidro duplo obteve o pior resultado, com um incremento de 2601 horas de conforto em comparação com o caso base. As estratégias de sombreamento com veneziana de alumínio e de revestimento com pastilhas cerâmicas não incrementaram significativamente as horas de conforto, devido às condições climáticas da cidade de Curitiba. De fato a cidade de Curitiba está localizada na zona bioclimática mais fria e, mesmo com os efeitos das mudanças climáticas, as estratégias de projeto para minimizar o desconforto térmico por calor, mostraram-se menos eficazes para melhorar o conforto térmico dos moradores da edificação (Figura 67, Apêndice D).

Na cidade de Belém as estratégias de isolamento térmico e da laje mista reduziram a quantidade de horas de conforto térmico. A pintura das paredes externas com baixa absorvância permitiu aumentar em até 25000 horas o conforto dos usuários (Figura 68, Apêndice D).

Os resultados obtidos mostram que, em condições de ventilação natural, nem todas as estratégias de projeto aplicadas na edificação são eficazes. A edificação com as estratégias de isolamento térmico, nas cidades de Belém e Florianópolis, apresentou pior desempenho, demonstrando que esta solução de projeto da envoltória não é uma solução eficaz quando a edificação funciona exclusivamente com ventilação natural.

6.1.3. Parâmetro energético

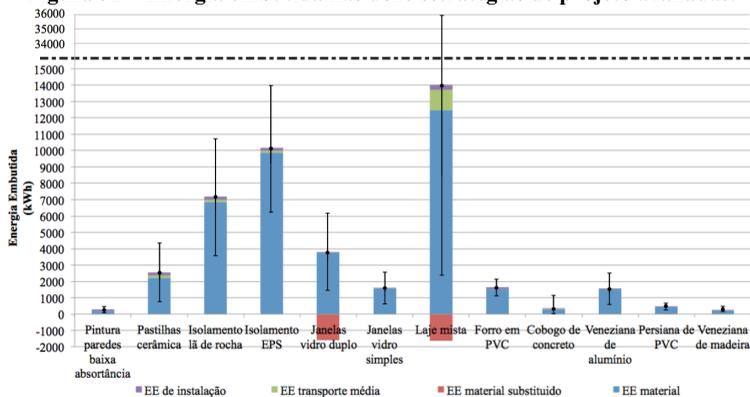
A seguir serão apresentados os resultados do parâmetro energético obtidos ao longo do ciclo de vida energético. Os resultados obtidos nas três cidades brasileiras nas fases do ciclo de vida das estratégias de projeto foram os mesmos pois foi utilizada a mesma base de dados. A única exceção foi a energia operacional obtida através das simulações energéticas. Além das dez estratégias de projeto aplicadas na edificação residencial foram avaliadas as estratégias da janelas de vidro simples e do forro de PVC presentes no caso base da edificação substituídas pela estratégia da janela de vidro duplo e da laje mista, respectivamente.

6.1.3.1. Energia Embutida

A primeira etapa da ACVE foi a energia embutida. As estratégias de projeto avaliadas apresentaram resultados de energia embutida muito diferentes. Como mostra a Figura 32, a estratégia com a menor energia

embutida foi a veneziana de madeira, com 241,8 kWh, enquanto a estratégia com a maior energia embutida foi a laje mista, ou seja 12365,1 kWh. Os fatores que mais influenciaram a quantidade de energia embutida nas estratégias de projeto foram o tipo e a quantidade de material presente nas estratégias. A linha de mínimo e máximo em cada estratégia mostra a variação da energia embutida obtida utilizando diferentes bases de dados dos materiais e distância de transporte.

Figura 32 – Energia embutida nas doze estratégias de projeto avaliadas.



A energia de transporte teve baixa relevância na energia embutida em todas as estratégias avaliadas. As estratégias laje mista, cobogó de concreto e pastilhas cerâmicas, cuja energia de transporte representa, respectivamente, 12%, 10% e 6% da energia embutida, foram as únicas estratégias onde o transporte da estratégia do fabricante até a edificação apresentou uma parcela significativa na energia embutida. Isso deveu-se à quantidade de material transportado que, nas três estratégias, foi maior em comparação com as demais estratégias. Nas outras estratégias a energia de transporte representou menos de 3% da energia embutida.

Diferente da energia de transporte, a energia consumida para a instalação da estratégia teve participação maior na energia embutida das estratégias. Na pintura das paredes externas da edificação a energia consumida para a instalação da estratégia chegou a representar 39% da energia embutida final da mesma. Na veneziana de madeira a energia de instalação representou 12% da energia embutida. Nas outras estratégias a energia de instalação correspondeu a menos de 10% da energia embutida. Esta diferença deveu-se principalmente a dois fatores: os dias

de trabalho da mão de obra para instalação da estratégia e a baixa energia embutida do material nas estratégias cuja energia de instalação tem peso maior. Assim, as estratégias que precisaram de mais dias para a instalação geraram aumento na energia de transporte da mão de obra, que foi de 29 kWh por dia. Por exemplo, para instalação da laje mista os dias de trabalho foram dez (TCPO 14, 2013), que correspondeu a uma energia consumida de 290 kWh. No revestimento das paredes externas com pastilhas cerâmicas foram sete dias de trabalho com consumo de 208 kWh e para pintura das paredes externas da edificação foram quatro dias de trabalho com energia de instalação de 116 kWh. Percebeu-se que na estratégia laje mista o valor de energia de instalação foi maior, porém, ainda assim representou somente 2% da energia embutida. Isso ocorreu porque a energia do material da estratégia é muito alta (12075 kW) devido à complexidade e à quantidade de material presente. Por outro lado, como observado anteriormente, a energia consumida para execução da pintura externa, mesmo sendo menor que na estratégia laje mista, representou 39% da energia embutida devido à baixa energia do material (180,1 kWh).

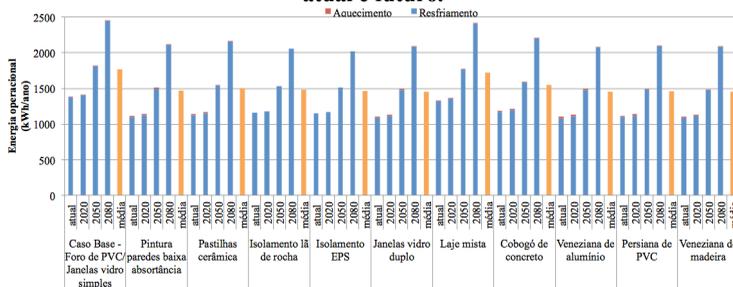
Além disso, a Figura 32 apresenta a variação da energia embutida para cada estratégia. As diferentes bases de dados utilizadas, assim como as diferentes distâncias de transporte do fabricante até a edificação pode modificar o resultado final da energia embutida. A laje mista, assim como o cobogó de concreto, foram as duas estratégias com a maior variação, 77%. A diferença na energia embutida destas duas estratégias deveu-se principalmente à base de dados do concreto (ICE, 2012) que apresentou uma grande variação. Entre as doze estratégias, o forro de PVC foi a que teve a menor variação (28%). As três distâncias analisadas (50 km, 250 km e 1000 km) para o transporte das estratégias de projeto do fabricante até a edificação influenciaram de menor forma a variação na energia embutida. As estratégias com maior variação na energia de transporte foram o cobogó de concreto, a laje mista e as pastilhas cerâmicas das paredes externas onde, dependendo da distância, a variação chegou a alterar o resultado final da energia embutida em 12%, 9% e 6%, respectivamente. Esta variação é mais sensível nas estratégias onde a quantidade de material foi maior, o que consequentemente provocou aumento no consumo do transporte. Estes resultados mostraram que a variação na energia embutida depende principalmente da base de dados utilizada na análise das estratégias de projeto.

6.1.3.2. Energia Operacional

Por meio das simulações computacionais desenvolvidas com o programa *Energy Plus* foi possível analisar o comportamento energético da edificação residencial durante os 63 anos de vida útil. A edificação com as estratégias de projeto foi avaliada nas três cidades brasileiras separadamente.

A Figura 33 apresenta o desempenho energético da edificação em Florianópolis, quando condicionada artificialmente, no caso base e com as estratégias aplicadas na envoltória. O forro de PVC e a janelas de vidro simples, fazem parte do caso base, pois são estratégias já existentes na edificação. Além disso, os resultados apresentam o desempenho da edificação atual e nos três períodos futuros, para analisar o comportamento das diferentes estratégias considerando os efeitos das mudanças climáticas no consumo de energia na edificação.

Figura 33 – Consumo anual de energia para o condicionamento da edificação com e sem as estratégias de projeto na cidade de Florianópolis, atual e futuro.



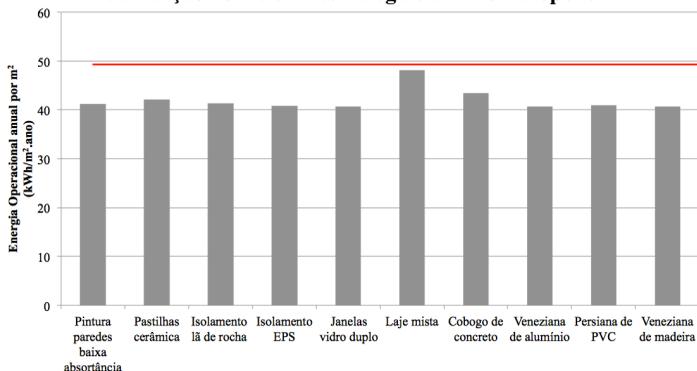
Os resultados mostraram que o consumo de energia para o condicionamento da edificação, nos diferentes casos avaliados, aumentará nas próximas décadas. Este aumento é devido principalmente ao consumo de energia para resfriamento dos ambientes. Por outro lado o consumo para aquecimento diminuirá consideravelmente até 2080, representando uma parcela insignificante no consumo total da edificação (menor que 1%). Em geral, o aumento do consumo para o condicionamento da edificação, em 2020, será de aproximadamente 2% nas diferentes estratégias, enquanto que em 2050 e 2080 este consumo aumentará 34% e 65%, respectivamente, em comparação com o atual. Os resultados apresentados mostram também que todas as estratégias

aplicadas na edificação permitiram reduzir o consumo anual de energia em comparação com o caso base.

Da mesma forma, as mudanças climáticas terão um efeito significativo no consumo de energia nas cidades de Curitiba e Belém. Em Belém a demanda de energia aumentará de forma mais significativa enquanto em Curitiba o aumento do consumo de energia para resfriamento e a diminuição para aquecimento minimizará o aumento da demanda de energia final nos próximos 63 anos de vida da edificação (Figuras 69 e 70, Apêndice D).

A Figura 34, mostra que a demanda de energia operacional anual média da edificação no caso base, na linha vermelha, foi de 49,32 kWh/m².ano na cidade de Florianópolis. A estratégia que menos permitiu reduzir o consumo de energia na edificação foi a laje mista (48,17 kWh/m².ano). Por outro lado, a edificação com janelas de vidro duplo obteve consumo de 40,72 kWh/m².ano, ou seja, foi a estratégia com o melhor desempenho.

Figura 34 – Consumo anual médio de energia para condicionamento da edificação com e sem estratégias em Florianópolis.

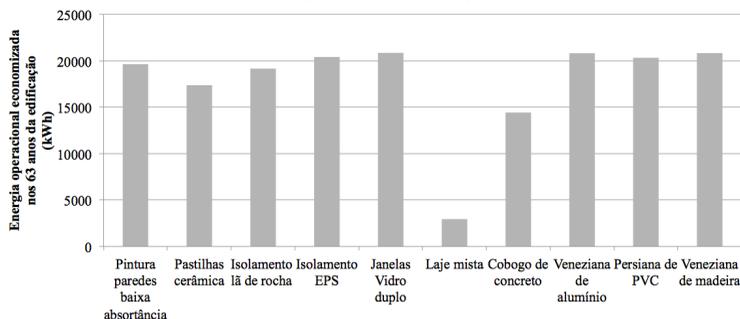


Também em Curitiba todas as estratégias selecionadas permitiram reduzir a demanda de energia para aquecimento e resfriamento. A demanda de energia operacional anual média do caso base foi de 26,71 kWh/m².ano. A estratégia que menos permitiu reduzir o consumo de energia na edificação foi a laje mista, com consumo de 24,90 kWh/m².ano. Por outro lado, a edificação com isolamento com EPS teve consumo de 19,89 kWh/m².ano, ou seja, foi a estratégia com o melhor desempenho (Figura 71, Apêndice D).

Em Belém, a demanda de energia operacional anual média da edificação no caso base foi de 139,22 kWh/m².ano. A estratégia que menos permitiu reduzir o consumo de energia da edificação foi a laje mista (138,17 kWh/m².ano). Por outro lado, a edificação com isolamento com EPS obteve consumo de 99,95 kWh/m².ano, sendo a estratégia com o melhor desempenho (Figura 72, Apêndice D).

Como apresenta a Figura 35, a energia economizada nos 63 anos de vida da edificação varia dependendo da estratégia utilizada. Assim, em Florianópolis, como ressaltado anteriormente, a laje mista foi a estratégia que menos reduziu o consumo de energia na fase operacional, em 2946 kWh (2%), enquanto que as janelas com vidro duplo permitiram a maior economia de energia, ou seja, 20840 kWh (18%). Entre as quatro estratégias de sombreamento avaliadas, observou-se que as venezianas de alumínio e de madeira, e a persiana de PVC apresentaram resultados parecidos, permitindo reduzir mais de 20000 kWh no ciclo de vida, enquanto o cobogó de concreto permitiu economizar 14420 kWh. A pintura das paredes externas (19613 kWh) obteve melhor desempenho em comparação com as pastilhas cerâmicas aplicadas no revestimento externo das paredes (17352 kWh). Entre os dois tipos de isolamentos térmicos analisados, o isolamento com EPS foi o que mais reduziu o consumo de energia (20399 kWh), enquanto o isolamento com lã de rocha reduziu o consumo em 19142 kWh. Analisando os primeiros resultados pode-se afirmar que as estratégias aplicadas foram apropriadas para melhorar o desempenho energético da edificação na cidade de Florianópolis em comparação com o caso base.

Figura 35 – Energia economizada nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias em Florianópolis.



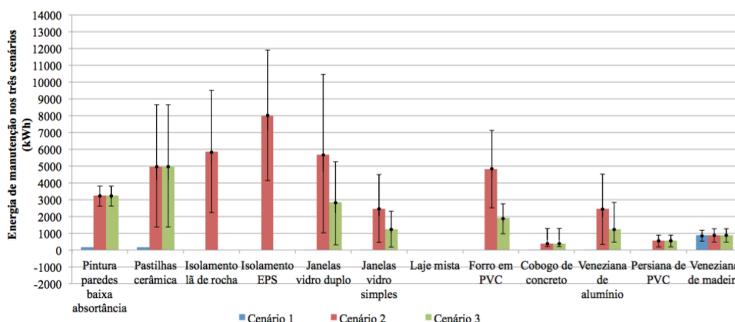
Em Curitiba, a laje mista foi a estratégia que menos reduziu o consumo de energia na fase operacional, 4647 kWh (7,2%), enquanto o isolamento da envoltória com EPS permitiu a maior economia de energia, ou seja, 16794 kWh (26,2%). Entre as quatro estratégias de sombreamento avaliadas, observou-se que a persiana de PVC, e as venezianas de madeira e de alumínio apresentaram resultados parecidos, permitindo reduzir aproximadamente 15000 kWh no ciclo de vida, enquanto o cobogó de concreto permitiu economizar 10900 kWh. A pintura das paredes externas (15171 kWh) obteve melhor desempenho em comparação com as pastilhas cerâmicas aplicadas no revestimento externo das paredes (13785 kWh) (Figura 73, Apêndice D).

Assim como nas duas cidades acima, em Belém a laje mista foi a estratégia que menos reduziu o consumo de energia na fase operacional da edificação (2513 kWh ou 0,8%), enquanto o isolamento da envoltória com EPS permitiu a maior economia de energia, ou seja, 94400 kWh (28,2%). Entre as quatro estratégias de sombreamento avaliadas, observou-se que a persiana de PVC, e as venezianas de madeira e de alumínio apresentaram resultados parecidos, permitindo reduzir aproximadamente 30000 kWh de energia no ciclo de vida, enquanto o cobogó de concreto permitiu economizar 20000 kWh. A pintura das paredes externas (31382 kWh) obteve melhor desempenho em comparação com as pastilhas cerâmicas aplicadas no revestimento externo das paredes (28029 kWh). Todas as estratégias de projeto aplicadas na edificação residencial unifamiliar resultaram apropriadas para melhorar o desempenho energético da edificação em comparação com o caso base (Figura 74, Apêndice D).

6.1.3.3. Energia de Manutenção

A Figura 36 apresenta os três cenários de manutenção das estratégias de projeto avaliadas na edificação sem a fase de reuso com as variações dos resultados obtidos com as diferentes bases de dados. Entre os três cenários, o cenário 1 apresentou o melhor desempenho em todas as estratégias devido à não substituição das mesmas. A energia de manutenção é a energia gasta para limpeza e, no caso da veneziana de madeira, também para a pintura. No cenário 2 a maioria das estratégias de projeto obtiveram o pior desempenho devido à base de dados utilizada na substituição das estratégias. No cenário 3 a energia de manutenção das estratégias apresentou situação intermediária.

Figura 36 – Energia de manutenção das estratégias de projeto nos diferentes cenários nas três cidades brasileiras.



No cenário 1 a veneziana de madeira apresentou a maior energia de manutenção (896 kWh) devido à pintura a cada dois anos. As outras estratégias apresentaram energia de manutenção abaixo de 200 kWh no ciclo de vida da edificação. Nas estratégias de projeto de isolamento térmico assim como de cobertura (laje mista e forro de PVC) a energia de manutenção foi zero pois não necessitaram manutenção. Na veneziana de madeira, além da manutenção ordinária (pintura e limpeza), foi avaliado o consumo de energia para o transporte da tinta até a edificação. Representou 44% da energia de manutenção, pois a tinta deve ser comprada cinco vezes ao longo da vida útil da edificação, incidindo no consumo final. Além disso, a veneziana de madeira também foi a única que apresentou uma variação na energia de manutenção devido à base de dados utilizada para a tinta. Esta variação alterou a energia de manutenção da veneziana de madeira em 58% no cenário 1.

No segundo cenário o cobogó de concreto e a persiana de PVC, respectivamente, com 392 kWh e 568 kWh, foram as estratégias com a menor energia de manutenção. Por outro lado as duas estratégias de isolamento térmico com lâ de rocha e com EPS, respectivamente, com 5843 kWh e 8010 kWh, foram as estratégias com a maior energia de manutenção. A energia de demolição para a substituição da estratégia representou uma pequena parcela na energia de manutenção no cenário dois, com exceção da pintura das paredes externas da edificação. Neste caso a energia de demolição representou 48% da energia de manutenção final. Isso deveu-se à remoção da pintura existente que, por ser um processo demorado (TCPO, 2014), exige maior consumo com mão de

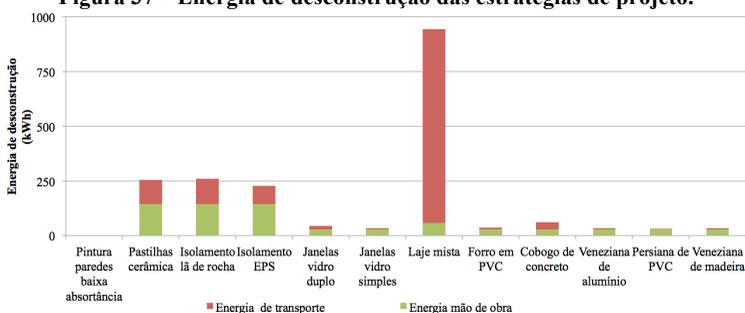
obra na demolição. Em geral, a energia de substituição foi a primeira causa do consumo de energia de manutenção e representou mais de 90% nas estratégias de isolamento, nas janelas e na veneziana de alumínio. O segundo fator foi a energia de instalação da estratégia substituída, como no caso da pintura das paredes externas que representou 18% da energia de manutenção. O valor final da energia de manutenção variou significativamente dependendo principalmente da base de dados utilizada e, em segundo lugar, da distância de transporte da estratégia. Assim, o cobogó de concreto foi a estratégia com a maior variação (214%) devido à base de dados do concreto. Por outro lado, a pintura das paredes externas foi a estratégia com a menor variação (20%).

Enfim, no terceiro cenário, a substituição das estratégias de projeto foi baseada na vida útil dos materiais e componentes construtivos levantados na literatura nacional e internacional. Neste caso as estratégias de isolamento térmico e a laje mista não foram avaliadas pois, segundo a literatura consultada, as três estratégias têm vida útil maior ou igual a vida útil da edificação. No cenário 3 as pastilhas cerâmicas usadas como revestimentos das paredes externas foi a estratégia com a maior energia de manutenção com 4957 kWh. Como no cenário 2, o cobogó de concreto e a persiana de PVC foram as estratégias com a menor energia de manutenção, respectivamente, 392 kWh e 568 kWh. A energia de substituição continuou sendo a que mais incidiu na energia de manutenção final de cada estratégia, com exceção da pintura das paredes externas e da veneziana de madeira. Assim, na pintura das paredes externas o que mais incidiu sobre a energia de manutenção foi a energia de desconstrução (49%) enquanto na veneziana de madeira foi a energia de manutenção ordinária para pintura (56%). A variação dos resultados da energia de manutenção no cenário 3 mostrou que o cobogó de concreto, foi a estratégia com a maior variação (214%), devido à base de dados do concreto. A pintura das paredes externas continuou sendo a estratégia com a menor variação (20%). Estes resultados mostraram que a escolha da base de dados na ACVE é um aspecto fundamental e pode modificar de forma significativa a avaliação final como demonstrado em pesquisas internacionais (RAMESH et al., 2010; CABEZA et al., 2014; KARIMPOUR et al., 2014).

6.1.3.4. Energia de Desconstrução

A energia de desconstrução das estratégias de projeto é apresentada na Figura 37.

Figura 37 – Energia de desconstrução das estratégias de projeto.

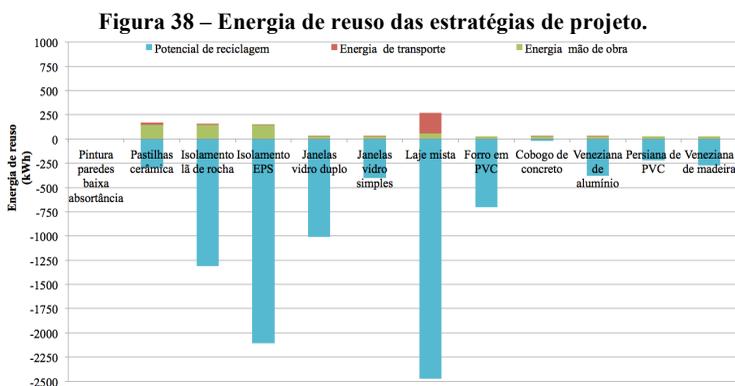


A laje mista foi a estratégia com o maior consumo de energia (943 kWh), enquanto a pintura das paredes externas foi a única estratégia a apresentar consumo de energia equivalente a zero. Na maioria das estratégias de projeto, a energia consumida para a demolição da estratégia representou a parcela maior. Assim, na persiana de PVC e nas venezianas de madeira e alumínio a energia consumida pela mão de obra na fase de desconstrução representou mais de 90% da energia de desconstrução final. Por outro lado, na laje mista o transporte do material até o aterro sanitário representou 94% da energia de desconstrução devido à quantidade de material da estratégia.

6.1.3.5. Energia de Reuso

A energia de reuso das diferentes estratégias de projeto foi avaliada a título informativo. A Figura 38 apresenta os resultados da energia de reuso das diferentes estratégias de projeto avaliadas. Através dessa análise foi possível observar que a reciclagem das estratégias de projeto reduziu o consumo de energia para reproduzir a mesma estratégia com materiais reutilizados. A laje mista e o cobogó de concreto foram as únicas estratégias nas quais a energia de transporte do material até a fábrica de reciclagem representou uma parcela significativa na energia consumida para a reciclagem da estratégia, com 12% e 18%, respectivamente. A veneziana de madeira foi a única

estratégia na qual o processo de reciclagem foi a combustão, pois o desgaste da madeira inviabiliza a reciclagem da mesma para a obtenção de novas venezianas. Mesmo assim, através do processo de combustão foi possível obter um potencial de reciclagem positivo que permitiu reduzir o consumo de energia no ciclo de vida da estratégia. A estratégia que obteve a maior energia de reuso foi a laje mista, devido também à grande quantidade de material presente na solução de projeto, enquanto o cobogó de concreto foi a estratégia com o menor potencial de reciclagem.



Os resultados mostraram que a reciclagem dos materiais da construção civil pode ser um importante instrumento para a redução do consumo de energia na ACVE. Como observado em recentes pesquisas (THORMARK, 2006; BLENGINI, 2008; CUELLAR-FRANCA, 2012), o transporte do material de demolição de uma edificação para o aterro sanitário é a pior opção para o ciclo de vida dos mesmos, não somente do ponto de vista energético mas também ambiental.

6.1.3.6. Ciclo de vida energético das estratégias de projeto

Após serem avaliadas todas as fases do ciclo de vida das estratégias de projeto foi analisada a energia na ACVE das estratégias nos diferentes cenários propostos.

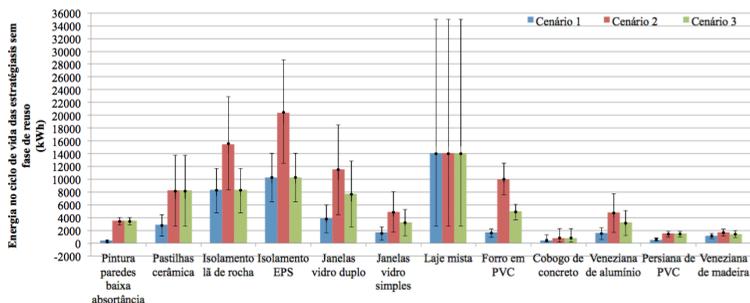
A Figura 39 apresenta os resultados do ciclo de vida energético das estratégias de projeto sem a energia de reuso nos três cenários de manutenção. Estes resultados são parciais, pois não contemplam o

desempenho da edificação com a aplicação das estratégias (energia operacional da edificação).

Os resultados mostraram que em todas as estratégias de projeto o cenário 1 obteve o melhor desempenho. Isso deveu-se à não substituição das estratégias, que permitiu reduzir a energia consumida no ciclo de vida em comparação com os outros dois cenários. No cenário 2, observou-se que as estratégias obtiveram o pior desempenho também em comparação com o cenário 3 devido às diferentes vidas úteis das estratégias na fase de manutenção. A estratégia laje mista foi a estratégia com a maior energia consumida no ciclo de vida (13772 kWh) nos cenários 1 e 3, enquanto no cenário 2 o isolamento com EPS obteve o pior desempenho (20414 kWh). O cobogó de concreto obteve o melhor desempenho energético nos três cenários com energia consumida de 411 kWh no melhor cenário. Entre as estratégias de revestimento das paredes externas, a pintura das paredes resultou ser a melhor solução nos três cenários analisados. O isolamento com lã de rocha também mostrou-se a melhor solução em termos de isolamento térmico em comparação com o isolamento com EPS, com energia no ciclo de vida inferior a 42%. Enfim, entre as duas tipologias de janelas, a janela com vidro simples apresentou energia no ciclo de vida aproximadamente 57% inferior à das janelas com vidro duplo.

Analisando a variação dos resultados de cada estratégia percebeu-se que, dependendo da distância de transporte e principalmente da base de dados da energia embutida dos materiais, os resultados variaram significativamente. Assim, no caso da estratégia em laje mista, o uso de diferentes bases de dados modificou o resultado final em 220%. Esta variação foi menor no cenário 1 em todas as estratégias de projeto, devido à não substituição da estratégia.

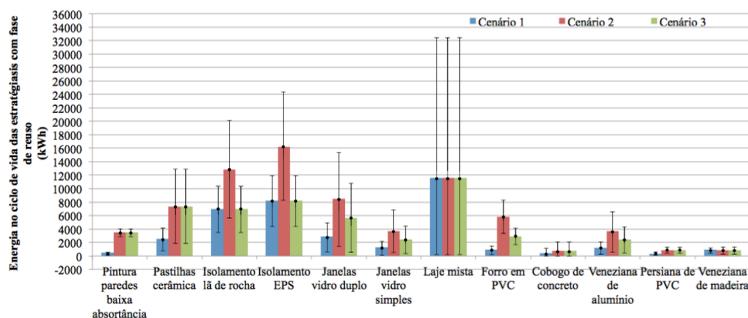
Figura 39 – Ciclo de vida energético das estratégias de projeto.



Analisando a variação dos resultados de cada estratégia percebeu-se que, dependendo da distância de transporte e principalmente da base de dados da energia embutida dos materiais, os resultados variaram significativamente. Assim, no caso da estratégia em laje mista, o uso de diferentes bases de dados modificou o resultado final em 220%. Esta variação foi menor no cenário 1 em todas as estratégias de projeto, devido à não substituição da estratégia.

A Figura 40 apresenta o ciclo de vida energético das estratégias de projeto considerando a energia de reuso. A estratégia de projeto laje mista continuou sendo a estratégia com a maior energia consumida no ciclo de vida (11301 kWh) no primeiro e terceiro cenários, enquanto no segundo cenário o isolamento com EPS obteve o pior desempenho (16200 kWh). A persiana de PVC, no cenário 1 (300 kWh), e o cobogó de concreto, nos cenários 2 e 3 (752 kWh) foram as estratégias com o melhor desempenho. O potencial de reciclagem permitiu reduzir o consumo de energia de forma significativa na maioria das estratégias analisadas. Com o potencial de reciclagem a energia consumida no ciclo de vida da persiana de PVC diminuiu aproximadamente em 79%, enquanto no isolamento térmico com lã de rocha a diferença foi mínima, de aproximadamente 1%. Na veneziana de madeira a redução da energia consumida no ciclo de vida com a energia de reuso chegou a 76%.

Figura 40 – Ciclo de vida energético das estratégias de projeto com a energia de reuso.



Como observado, o potencial de reciclagem foi fundamental para a redução do consumo de energia na maioria das estratégias no ciclo de vida da edificação. O processo de combustão, da veneziana de madeira, resultou ser o que mais diminuiu o consumo de energia da estratégia no

ciclo de vida, como também demonstrado em outras pesquisas (THORMARK, 2006; CUELLAR-FRANCA, 2012). Porém, do ponto de vista ambiental, este processo é inadequado pois aumenta as emissões de poluentes no ambiente pela combustão do material.

Os resultados do ciclo de vida das estratégias mostraram grande variabilidade devido à base de dados utilizada na avaliação. Por esta razão, esta variação deve ser considerada na escolha das estratégias de projeto pois quanto menor for esta variação maior a garantia da precisão da análise no ciclo de vida.

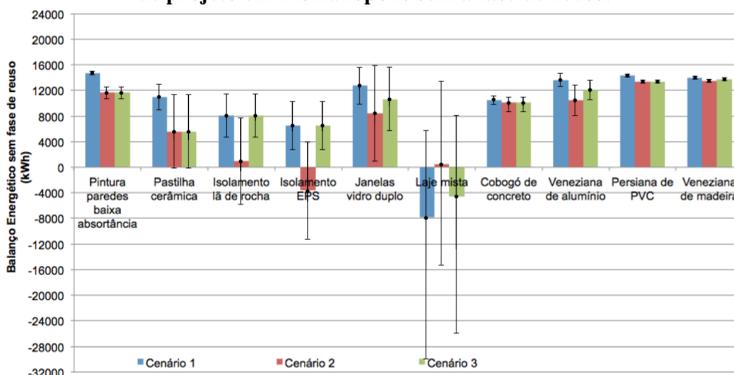
6.1.3.7. Balanço energético

Analisadas as estratégias de projeto nas diferentes fases do ciclo de vida energético, o passo final foi avaliar o balanço energético da edificação residencial com as diferentes estratégias nas três cidades brasileiras. Assim, são apresentados os resultados das dez estratégias de projeto aplicadas na edificação nos três diferentes cenários com e sem o potencial de reciclagem. Nesta fase a energia no ciclo de vida das duas estratégias substituídas, forro de PVC e janelas com vidro simples, foi descontada no balanço energético das estratégias da laje mista e das janelas em vidro duplos, respectivamente.

A Figura 41 apresenta os resultados finais do balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Florianópolis. As dez estratégias foram avaliadas nos três cenários de manutenção. Os resultados mostraram que a única estratégia que obteve balanço energético negativo nos três cenários de manutenção, com e sem potencial de reciclagem, foi a laje mista. Entre os três cenários avaliados o cenário 1 foi o que obteve o melhor balanço energético em todas as estratégias de projeto. A pintura das paredes externas com baixa absorvância mostrou-se, na ACVE, a melhor solução no tipo de revestimento externo das paredes da edificação em comparação com a edificação com pastilhas cerâmicas. Através do uso da pintura externa foi possível obter balanço energético até 32% melhor em comparação com as pastilhas cerâmicas. Entre as duas estratégias de isolamento térmico, o isolamento com lã de rocha obteve o melhor balanço energético em todos os cenários em comparação com o isolamento com EPS. Este resultado mostrou que o isolamento com EPS, mesmo obtendo melhor desempenho durante a fase operacional da edificação, foi a pior escolha no ciclo de vida energético obtendo balanço energético negativo no cenário 2. Isso deveu-se a energia embutida e de

manutenção maior no isolamento com EPS do que na lâ de rocha. Outro resultado interessante foi do cobogó de concreto que nos cenários 2 e 3 obteve balanço energético melhor do que estratégias como as pastilhas cerâmicas e o isolamento térmico que na fase operacional apontaram desempenho energético melhor. Isso porque o cobogó de concreto é uma estratégia que utiliza materiais com baixa energia embutida e também baixa energia de manutenção em comparação com as demais estratégias. A variação dos resultados devido ao uso de diferentes bases de dados e da distância de transporte foi considerada. Assim, a laje mista avaliada com os menores valores de energia embutida na base de dados e de transporte, pode obter resultado positivo nos três cenários do balanço energético. Nas estratégias de isolamento térmico a variabilidade da base de dados pode mudar o resultado final obtendo balanço energético negativo tanto no isolamento com EPS quanto no uso da lâ de rocha. Na comparação entre a pintura das paredes externas e o revestimento em pastilhas cerâmicas, dependendo da base de dados utilizada, pôde-se observar que nos cenários 2 e 3 a pastilha cerâmica, no seu melhor desempenho, obteve melhor balanço energético que a pintura das paredes no seu pior desempenho. Da mesma forma, o cobogó de concreto obteve melhor desempenho que a veneziana de alumínio, considerando a variação máxima e mínima das duas estratégias no cenário 2. Isso demonstra que a base de dados utilizada na avaliação da ACVE pode influenciar na escolha da estratégia de projeto mais apropriada para a edificação, assim como na avaliação e no resultado final da ACVE, como demonstrado em pesquisas internacionais (RAMESH et al., 2010; YUNGAT et al., 2013; KARIMPOUR et al., 2014; CABEZA et al., 2014). Os valores de energia embutida dos materiais podem variar na mesma região, dependendo de inúmeros fatores, tais como a tecnologia utilizada nas diferentes fases de fabricação do produto, assim como o meio de transporte utilizado. Em um país com dimensões continentais como o Brasil seria difícil definir uma única base de dados para todo o território, por isso a análise da variação no balanço energético final da edificação com as diferentes estratégias é um aspecto que deve ser considerado na hora da escolha das estratégias de projeto. Neste método é aconselhável escolher as estratégias de projeto que não somente obtiveram o melhor balanço energético, mas que ao mesmo tempo apresentaram a menor variação, como demonstraram as estratégias da persiana de PVC, a veneziana de madeira, a pintura das paredes e o cobogó de concreto.

Figura 41 – Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Florianópolis sem a fase de reuso.



Através da fase de reuso as estratégias de projeto obtiveram melhor balanço energético. Assim, o balanço energético diminuiu em até 18% no isolamento com EPS, 11,3% nas janelas com vidro duplo, 8,9% nas pastilhas cerâmicas e até 6,7% nas venezianas de alumínio. Nas outras estratégias a variação da energia do balanço energético com o potencial de reciclagem foi menos relevante (Figura 75, Apêndice D).

Em Curitiba os resultados mostraram que, assim como na cidade de Florianópolis, a estratégia da laje mista obteve o pior desempenho na maioria dos cenários avaliados obtendo balanço energético negativo. Também o isolamento com EPS no cenário 2 sem o potencial de reciclagem obteve balanço energético negativo (-3620 kWh). No balanço energético com o potencial de reciclagem, a pintura das paredes, no cenário 1, foi a estratégia que obteve o melhor resultado, ou seja, com balanço energético de 14716 kWh, enquanto nos cenários 2 e 3 a veneziana de madeira obteve o melhor resultado com 14194 kWh e 14209 kWh, respectivamente. No balanço energético sem o potencial de reciclagem a pintura das paredes, no cenário 1, permaneceu a estratégia com o melhor resultado, ou seja, com balanço energético de 14716 kWh (Figura 76, Apêndice D).

Em Belém os resultados mostraram que a única estratégia que obteve balanço energético negativo, com e sem potencial de reciclagem, também foi a laje mista nos três diferentes cenários avaliados. No balanço energético o uso do isolamento térmico com EPS na envoltória da edificação, foi a estratégia que obteve o melhor resultado com

balanço energético superior a 80000 kWh, nos três cenários avaliados. As estratégias de isolamento térmico das paredes obtiveram o melhor desempenho energético da edificação no ciclo de vida. Entre as estratégias de revestimentos externos das paredes, a pintura com baixa absorvância obteve melhor desempenho em comparação às pastilhas cerâmicas reduzindo em até 25% a energia consumida no ciclo de vida. O uso de vidro duplo permitiu obter balanço energético melhor em até 10% em comparação com o uso de elementos de sombreamento nas aberturas (Figura 77, Apêndice D).

Dessa primeira análise pôde-se concluir que todas as estratégias avaliadas, com exceção da laje mista e do isolamento térmico com EPS em alguns cenários, permitiram melhorar o desempenho energético da edificação no ciclo de vida. Nas três cidades as estratégias de projeto aplicadas na edificação apresentaram desempenhos energéticos diferentes no ciclo de vida. O cenário 1 mostrou-se a melhor solução em todas as estratégias nas três cidades, enquanto o pior foi o cenário 2. A fase de reuso modificou os resultados finais, melhorando o desempenho das estratégias de projeto.

6.1.4. Parâmetro das emissões de CO₂

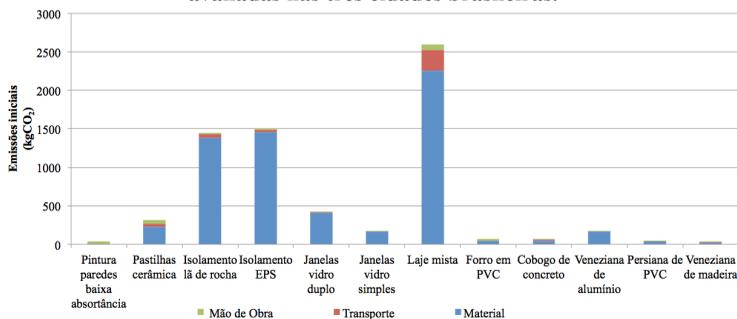
A seguir são apresentados os resultados das emissões de CO₂ das estratégias de projeto avaliadas nas diferentes fases do ciclo de vida segundo o método proposto. Diferentemente da análise da ACVE, os resultados das emissões de CO₂ não apresentaram variações, devido à única base de dados utilizada para os materiais (COSTA, 2012) e o transporte, para o qual utilizou-se a distância intermediária (250 km). A ausência de dados sobre as emissões geradas nas fases de reuso e reciclagem das estratégias no Brasil não permitiu avaliar este quesito no estudo de caso brasileiro. Os resultados das estratégias de projeto nas três cidades brasileiras em todas as fases do ciclo de vida, com exceção para a fase operacional, são os mesmos pois foi utilizada a mesma base de dados das emissões de CO₂.

6.1.4.1. Emissões de CO₂ na fase inicial

A primeira etapa da análise das emissões de CO₂ no ciclo de vida, nas dez estratégias de projeto aplicadas na edificação residencial brasileira, foram as emissões de CO₂ na fase inicial das estratégias.

As estratégias de projeto avaliadas apresentaram resultados de emissões muito diferentes. Como mostra a Figura 42, a estratégia com a menor emissão embutida foi a pintura das paredes com baixa absorvância (34,6 kgCO₂), enquanto a estratégia com a maior emissão embutida foi a laje mista (2596,9 kgCO₂). Os fatores que mais influenciaram os resultados das diferentes estratégias de projeto foram o tipo de material assim como a quantidade de material presente em cada estratégia. Por outro lado as emissões devidas ao transporte e à instalação representaram menos de 20% do total das emissões iniciais na maioria das estratégias analisadas. As únicas exceções foram a pintura das paredes externas e o forro de PVC, cujas emissões devidas à mão de obra representaram 80% e 39%, respectivamente. Isso deveu-se à quantidade de dias de trabalho para a instalação da estratégia maior em comparação com as demais estratégias. Entre as estratégias de isolamento térmico, o isolamento com EPS obteve o pior desempenho, com 1506,2 kgCO₂ emitido, enquanto o isolamento com lã de rocha apresentou redução de 4% das emissões geradas. Entre os elementos de sombreamento, a veneziana de alumínio foi a estratégia que gerou mais emissões de CO₂ (171,4 kg) devido ao uso do alumínio na estratégia. Em geral observou-se que as estratégias que utilizaram materiais naturais ou menos trabalhados, como madeira e concreto, geraram uma quantidade de CO₂ menor.

Figura 42 – Emissões de CO₂ na fase inicial das doze estratégias de projeto avaliadas nas três cidades brasileiras.



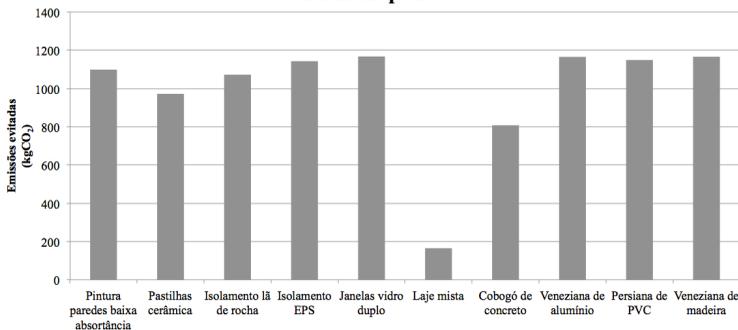
6.1.4.2. Emissões de CO₂ na fase operacional

Avaliadas as estratégias de projeto na fase inicial, o passo sucessivo foi analisar as emissões geradas na fase operacional com a

aplicação das estratégias de projeto. Nesta fase, foram avaliadas dez estratégias de projeto, pois as estratégias janela com vidro simples e forro de PVC são inerentes à edificação do caso base.

A Figura 43 apresenta os resultados das emissões de CO₂ evitadas na fase operacional da edificação em Florianópolis por meio do uso das dez estratégias de projeto. Os resultados mostraram que todas as estratégias aplicadas no estudo de caso permitiram reduzir a geração de CO₂ na vida útil da edificação. O melhor desempenho foi obtido pela janela com vidro duplo, pois reduziram as emissões em 1167 kgCO₂. Por outro lado, a laje mista foi a estratégia que menos diminuiu as emissões de CO₂ (167 kg).

Figura 43 – Emissões evitadas com as estratégias de projeto em Florianópolis.



Em Curitiba os resultados mostraram que, assim como na cidade de Florianópolis, todas as estratégias aplicadas no estudo de caso permitiram reduzir a emissão de CO₂ na fase operacional. O melhor desempenho foi obtido através do isolamento com EPS que permitiu reduzir as emissões de 940 kgCO₂ na fase operacional. Por outro lado, a laje mista foi a estratégia que menos diminuiu as emissões de CO₂ (140 kg) (Figura 78, Apêndice D).

Também em Belém os resultados mostraram que todas as estratégias aplicadas no estudo de caso possibilitaram a redução da geração de CO₂ na fase operacional. O melhor desempenho foi obtido pelo isolamento com EPS que reduziu as emissões de 5286 kgCO₂. Por outro lado, a laje mista foi a estratégia que menos reduziu as emissões de CO₂ (140 kg) (Figura 79, Apêndice D).

6.1.4.3. Emissões de CO₂ de manutenção

As emissões geradas na fase de manutenção das estratégias de projeto foram avaliadas nos três cenários exibidos no método. A Figura 44 apresenta os três cenários de emissões na fase de manutenção das estratégias de projeto avaliadas na edificação. O cenário 1 apresentou a menor quantidade de emissões de CO₂ em todas as estratégias devido à não substituição das mesmas. No cenário 2 a maioria das estratégias de projeto obtiveram o pior desempenho devido à base de dados utilizada na substituição das estratégias. No cenário 3, pela mesma razão, as emissões de CO₂ das estratégias apresentaram a situação intermediária.

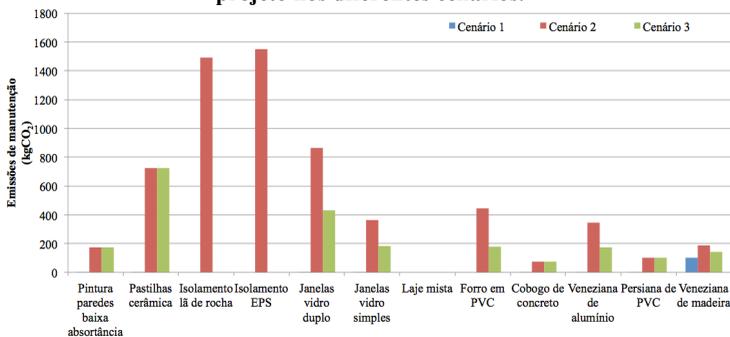
No cenário 1 a estratégia da veneziana de madeira apresentou a maior quantidade de emissões (102 kgCO₂) em decorrência da reaplicação da pintura na estratégia a cada dois anos. As outras estratégias apresentaram baixas emissões, pois a limpeza da estratégia é pouco impactante nas emissões de CO₂. Nas estratégias de projeto de isolamento térmico assim como de cobertura (laje mista e forro de PVC) as emissões foram zero pois não precisaram de atividades de manutenção. Na veneziana de madeira, além da manutenção ordinária (pintura e limpeza), foram avaliadas as emissões geradas para o transporte da tinta até a edificação. Estas representaram 96% das emissões de CO₂ no cenário 1 enquanto ao longo da vida útil da edificação a tinta teve que ser comprada cinco vezes, incidindo nas emissões finais.

No segundo cenário a única estratégia que não foi avaliada foi a laje mista, pois, sendo considerada uma parte estrutural da edificação, apresentou a mesma vida útil da edificação. O cobogó de concreto e a persiana de PVC, respectivamente, com 76,5 kgCO₂ e 103,5 kgCO₂, foram as estratégias com as menores emissões. Por outro lado as duas estratégias de isolamento térmico com lã de rocha e com EPS, respectivamente, com 1493,0kgCO₂ e 1549,0 kgCO₂, foram as estratégias com o pior desempenho. Em todas as estratégias a substituição foi o fator que mais incidiu nas emissões de CO₂ (mais de 80%), com exceção da veneziana de madeira onde a manutenção representou 55% das emissões. Isso deveu-se a pintura das venezianas a cada dois anos o que provocou elevadas emissões. As emissões de demolição para a substituição da estratégia representaram uma pequena parcela nas emissões de manutenção no cenário 2.

Enfim, no terceiro cenário, como observado anteriormente na ACVE, as estratégias de isolamento térmico e a laje mista não foram

avaliadas pois não foram substituídas. No cenário 3 as pastilhas cerâmicas usadas como revestimentos das paredes externas e as janelas com vidro duplo foram as estratégias com a maior quantidade de emissões, respectivamente, 722,3kgCO₂ e 433,1kgCO₂. Como no cenário 2, o cobogó de concreto e a persiana de PVC foram as estratégias com as menores emissões, ou seja, 76,5kgCO₂ e 103,5kgCO₂, respectivamente. As emissões geradas para a substituição continuam sendo o que mais incide na energia de manutenção final de cada estratégia, com exceção à persiana de madeira.

Figura 44 – Emissões de CO₂ na fase de manutenção das estratégias de projeto nos diferentes cenários.



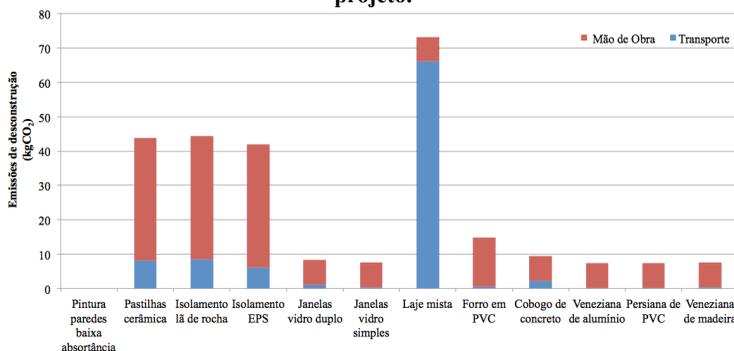
Em geral pode-se afirmar que a substituição das estratégias ao longo da vida útil da edificação impactou fortemente nas emissões de CO₂. Assim a melhor solução em todas as estratégias foi o cenário 1 quando não houve substituição da estratégia.

6.1.4.4. Emissões de CO₂ de desconstrução

A Figura 45 apresenta os resultados das emissões de CO₂ na fase de desconstrução das estratégias de projeto da edificação. Os resultados obtidos mostraram que a laje mista foi a estratégia que, na fase de desconstrução, gerou a maior quantidade de emissões de CO₂ (73,2 kg). Por outro lado, a pintura das paredes externas foi a única estratégia que não gerou emissões na fase de desconstrução devido à ausência de material gerado na demolição da estratégia. Pôde-se observar que na maioria das estratégias as emissões produzidas pela mão de obra representaram mais de 80% das emissões totais. A única exceção foi a

laje mista, onde 90% das emissões geradas na fase de desconstrução foram determinadas pelo transporte do material até o aterro sanitário. Isso se deveu a maior quantidade de material da estratégia em comparação com as outras estratégias avaliadas.

Figura 45 – Emissões de CO₂ na fase de desconstrução das estratégias de projeto.



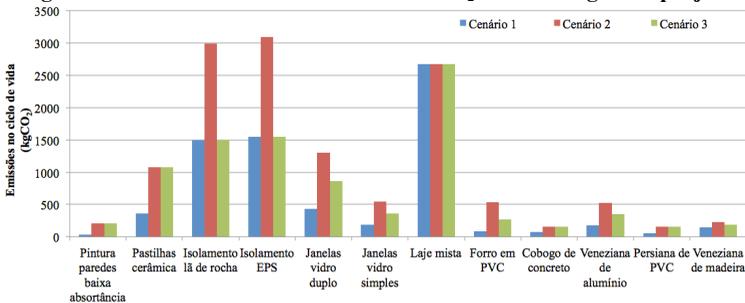
6.1.4.5. Ciclo de vida das estratégias nas emissões de CO₂

Após a avaliação das fases do ciclo de vida das emissões de CO₂ das estratégias de projeto foram analisadas então as emissões no ciclo de vida das estratégias nos diferentes cenários propostos. Estes resultados são parciais pois não contemplaram o desempenho da edificação com a aplicação das estratégias (emissões de dióxido de carbono na fase operacional da edificação).

A Figura 46 apresenta o ciclo de vida das emissões das estratégias de projeto geradas nos três cenários obtidos na avaliação das emissões na fase de manutenção. Os resultados evidenciaram que todas as estratégias de projeto no cenário 1 obtiveram o melhor desempenho. Isto deveu-se à não substituição das estratégias, que permitiu a redução das emissões de CO₂ no ciclo de vida em 60% em comparação com os outros dois cenários. Como observado na ACVE, no cenário 2, as estratégias obtiveram o pior desempenho também em comparação com o cenário 3, quando houve a substituição da estratégia. As estratégia de isolamento térmico com lã de rocha e com EPS foram as estratégias com a maior geração de CO₂ no ciclo de vida no cenário 2, enquanto nos outros dois cenários a laje mista obteve o pior desempenho (2670 kgCO₂). A pintura das paredes externas, no cenário 1 (37 kgCO₂), e o

cobogó de concreto, nos cenários 2 e 3 (152 kgCO₂) foram as estratégias com o melhor desempenho. Entre as estratégias de revestimento das paredes externas, a pintura das paredes resultou ser a melhor solução nos três cenários analisados. As duas estratégias de isolamento térmico não apresentaram diferenças significativas, enquanto entre as duas tipologias de janelas, a janela com vidro simples apresentou emissões de CO₂ no ciclo de vida inferior a 58% em comparação com as janelas com vidro duplo. Entre os elementos de sombreamento a veneziana de alumínio foi a estratégia com as maiores emissões de CO₂ nos três cenários propostos.

Figura 46 – Ciclo de vida das emissões de CO₂ das estratégias de projeto.



Os resultados das emissões de CO₂ das estratégias de projeto no ciclo de vida mostraram que para reduzir os impactos ambientais das edificações a análise das emissões deve ser considerada desde as primeiras fases de projeto.

6.1.4.6. Balanço das emissões de CO₂

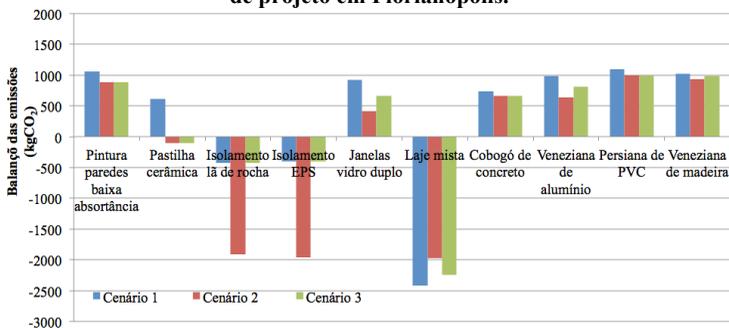
Analisadas as estratégias de projeto nas diferentes fases do ciclo de vida das emissões de CO₂, o passo final foi avaliar o balanço das emissões das estratégias de projeto aplicadas na edificação residencial nas três cidades brasileiras.

A Figura 47 apresenta os resultados finais do balanço das emissões de CO₂ da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Florianópolis. As dez estratégias foram avaliadas nos três cenários de manutenção.

Os resultados mostraram que, dependendo do cenário de manutenção, algumas estratégias de projeto obtiveram balanço de emissões de CO₂ negativo. Entre elas, a estratégia da laje mista e as duas

estratégias de isolamento térmico obtiveram balanço negativo nos três cenários, demonstrando não serem as escolhas mais adequadas no parâmetro das emissões de CO₂ no estudo de caso avaliado. Entre as dez estratégias a persiana de PVC obteve o melhor balanço de emissões de CO₂ nos diferentes cenários. Na maioria das estratégias avaliadas percebeu-se que o cenário 1 foi a melhor escolha no ciclo de vida da edificação. A substituição das estratégias aumentou as emissões de CO₂, reduzindo o balanço energético da edificação. Entre as estratégias de revestimentos externos das paredes, a pintura com baixa absorvância obteve melhor desempenho em comparação com as pastilhas cerâmicas reduzindo as emissões em até 1000 kgCO₂ no ciclo de vida. A substituição das janelas com vidro simples por vidro duplo também melhorou o balanço das emissões da edificação resultando uma escolha adequada no estudo de caso analisado.

Figura 47 – Balanço das emissões de CO₂ da edificação com as estratégias de projeto em Florianópolis.



Em Curitiba, os resultados obtidos foram parecidos com o desempenho das estratégias aplicadas na edificação em Florianópolis. Entre as dez estratégias a persiana de PVC obteve o melhor balanço de emissões de CO₂ nos diferentes cenários, enquanto a laje mista continuou sendo a pior escolha (Figura 80, Apêndice D).

Em Belém todas as estratégias obtiveram balanço de emissões de CO₂ positivo com exceção da estratégia da laje mista que, nos três cenários, obteve balanço negativo demonstrando-se, também em Belém, não ser a escolha projetual mais adequada no estudo de caso avaliado. Entre as dez estratégias, os dois isolamentos térmicos das paredes

obtiveram o melhor desempenho, ou seja, balanço positivo superior a 3000 kgCO₂ na maioria dos cenários (Figura 81, Apêndice D).

Os resultados obtidos no balanço das emissões de CO₂ nas diferentes estratégias mostraram que nem todas foram eficientes no parâmetro das emissões. Entre as três cidades a mesma estratégia obteve desempenho diferente, assim como os cenários de substituição também alteraram o desempenho da estratégia. Por isso, a escolha correta das estratégias de projeto deve levar em conta diversas variáveis para reduzir o impacto ambiental das emissões de CO₂ no ciclo de vida.

6.1.5. Parâmetro de custo

O último parâmetro avaliado foi o econômico financeiro através da ACCV. A análise foi realizada de forma separada devido ao uso de base de dados diferente para cada cidade.

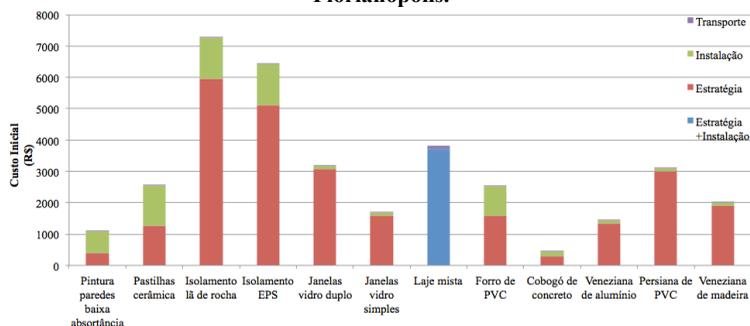
6.1.5.1. Custo inicial

A primeira etapa da ACCV nas estratégias de projeto aplicadas na edificação residencial brasileira, foi o custo inicial. Nas estratégias das janelas com vidro duplo, da persiana de PVC e da lâ de rocha o preço da estratégia foi obtido através de uma pesquisa de mercado nos principais fornecedores de cada cidade.

A Figura 48 apresenta os custos iniciais das estratégias aplicadas na edificação na cidade de Florianópolis. A estratégia com o menor custo financeiro inicial foi o cobogó de concreto aplicado nas três aberturas da edificação com custo inferior a R\$ 500,00, enquanto a estratégia com o maior custo foi o isolamento com lâ de rocha com custo superior a R\$ 7.000,00. Isso deve-se ao baixo uso deste material na construção civil no Brasil o que aumenta o seu custo não somente da estratégia em si mas também na sua instalação. Em geral percebeu-se que na maioria das estratégias de projeto o custo da estratégia em si representou a maior parcela no custo inicial como demonstrado nas estratégias de sombreamento, onde 90% do custo inicial provém do custo das estratégias. Nas estratégias pintura das paredes e pastilhas cerâmicas aplicadas nas fachadas externas da edificação o custo da instalação representou uma parcela significativa de 65% e 51%, respectivamente. Na estratégia da laje mista os custos da estratégia em si e da instalação foram avaliados juntamente porque o SINAPI (2016)

apresenta um único valor. Enfim, o custo de transporte teve pouca influência no custo inicial das estratégias.

Figura 48 – Custo inicial das estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.



Também na cidade de Curitiba a estratégia do cobogó de concreto aplicado nas três aberturas da edificação obteve o menor custo, R\$ 418,00, enquanto a estratégia do isolamento com lâ de rocha obteve o maior custo, R\$ 7.442,00. Na maioria das estratégias de projeto o custo da estratégia em si representou a parcela maior no custo inicial como demonstrado nas estratégias de sombreamento onde 90% do custo inicial é resultante do custo das estratégias. Nas estratégias da pintura das paredes e das pastilhas cerâmicas aplicadas nas fachadas externas da edificação o custo da instalação representou uma parcela significativa de 64% e 50%, respectivamente. Enfim, o custo de transporte influenciou pouco no custo inicial das estratégias (Figura 82, Apêndice D).

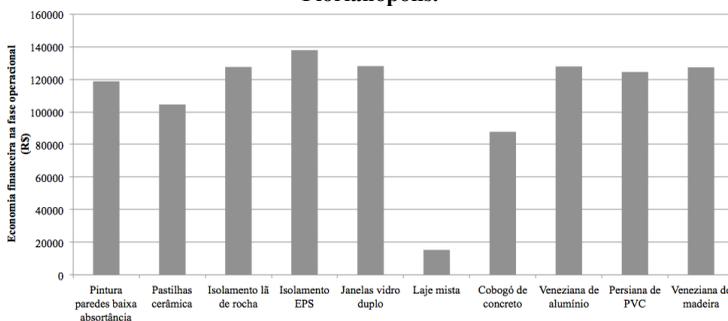
Em Belém o cobogó de concreto continuou sendo a estratégia com o menor custo financeiro inicial, R\$ 400,00, enquanto a estratégia do isolamento com lâ de rocha alcançou o maior custo, R\$ 10.015,00. Nas estratégias da pintura das paredes e das pastilhas cerâmicas aplicadas nas fachadas externas da edificação o custo da instalação representou uma parcela significativa de 57% e 32%, respectivamente. Assim como nas outras cidades, o custo de transporte em Belém influenciou pouco no custo inicial das estratégias (Figura 83, Apêndice D).

6.1.5.2. Custo operacional

Através da aplicação das estratégias de projeto conseguiu-se reduzir o consumo energético da edificação. Esta redução de energia elétrica se traduz, em termos econômicos, em menor gasto financeiro na fatura de energia.

A Figura 49 apresenta os resultados da economia na conta de luz através do uso das diferentes estratégias aplicadas na edificação na cidade de Florianópolis. A laje mista foi a estratégia com a menor economia financeira na vida útil da edificação, igual a R\$ 15.280,00. Por outro lado, o uso de isolamento térmico da envoltória com EPS permitiu economia de quase R\$ 140.000,00 nos 63 anos de vida da edificação. Através da aplicação de todas as estratégias de projeto conseguiu-se reduzir a conta de energia na fase operacional da edificação.

Figura 49 – Economia financeira na fase operacional na cidade de Florianópolis.



Em Curitiba a laje mista foi a estratégia com a menor economia financeira na vida útil da edificação, equivalente a R\$ 24.151,00. Por outro lado, o uso de venezianas de alumínio permitiu economia de R\$ 98.432,00 nos 63 anos de vida da edificação (Figura 84, Apêndice D).

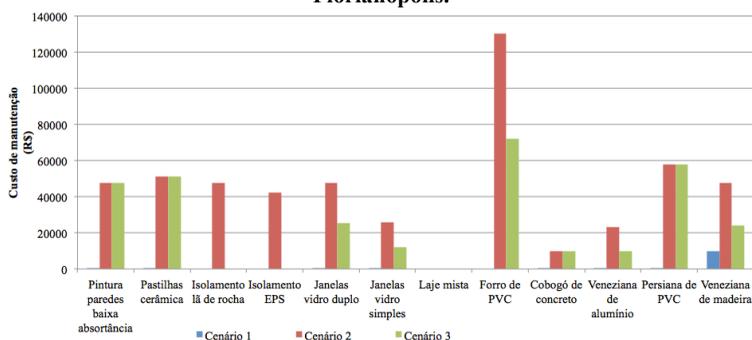
Enfim, em Belém, a laje mista foi a estratégia com a menor economia financeira na vida útil da edificação, igual a R\$ 18.614,00. Por outro lado, o uso de isolamento térmico de EPS na envoltória da edificação permitiu economia de R\$ 810.729,00 nos 63 anos de vida da edificação (Figura 85, Apêndice D).

6.1.5.3. Custo de manutenção

Após a avaliação do custo operacional, as estratégias foram avaliadas no custo de manutenção na vida útil da edificação. Também na ACVC o custo de manutenção foi avaliado nos três diferentes cenários ilustrados anteriormente.

A Figura 50 apresenta os resultados de custo de manutenção das diferentes estratégias nos três cenários de manutenção na cidade de Florianópolis. Entre os três cenários, o cenário 1 apresentou o menor custo inicial em todas as estratégias devido à não substituição das mesmas. No cenário 2 a maioria das estratégias de projeto obtiveram o pior desempenho devido à base de dados utilizada para avaliar o número de substituições das estratégias. A laje mista foi a única estratégia que nos três cenários não apresentou nenhum resultado pois não foram previstos custos para a sua manutenção. O forro de PVC foi a estratégia que obteve o pior resultado, com custo superior de R\$ 120.000,00 no cenário 2, pois a estratégia foi substituída cinco vezes gerando aumento significativo dos custos. O cobogó de concreto continuou sendo a estratégia com os menores custos nos três cenários, com custo inferior a R\$ 10.000,00 nos cenários 2 e 3. No cenário 1 a estratégia da veneziana de madeira apresentou o maior custo devido à aplicação da pintura a cada dois anos. As outras estratégias apresentaram custos de manutenção baixos devido à limpeza.

Figura 50 – Custo de manutenção das estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.



Também em Curitiba, o cenário 1 apresentou o menor custo inicial em todas as estratégias devido à não substituição das mesmas. O

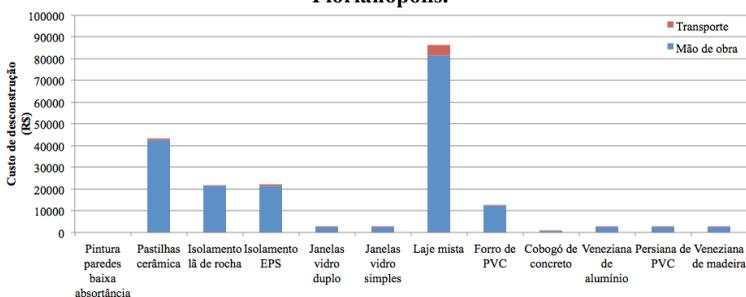
forro de PVC foi a estratégia que obteve o pior resultado, com custo de R\$ 130.134,00 no cenário 2, pois a estratégia foi substituída cinco vezes gerando aumento significativo dos custos. O cobogó de concreto continuou sendo a estratégia com os menores custos nos três cenários com custo inferior a R\$ 10.000,00 nos cenários 2 e 3. No cenário 1 a estratégia da veneziana de madeira apresentou o maior custo de manutenção (R\$ 11.763,00) devido à aplicação da pintura a cada dois anos. As outras estratégias apresentaram custos de manutenção irrelevantes devido à atividade de limpeza (Figura 86, Apêndice D).

Em Belém, os resultados foram semelhantes aos resultados apresentados nas outras duas cidades brasileiras. O forro de PVC é a estratégia que obteve o pior resultado, com custo de R\$ 172.114,00 no cenário 2, pois a estratégia foi substituída cinco vezes gerando aumento significativo dos custos. O cobogó de concreto continuou sendo a estratégia com os menores custos nos três cenários com custo inferior a R\$ 9.000,00 nos cenários 2 e 3 (Figura 87, Apêndice D).

6.1.5.4. Custo de desconstrução

O custo de desconstrução das estratégias de projeto foi a última fase avaliada. A Figura 51 apresenta os resultados de custo de desconstrução das diferentes estratégias aplicadas na edificação estudo de caso na cidade de Florianópolis.

Figura 51 – Custo de desconstrução das estratégias de projeto na cidade de Florianópolis.



Os resultados obtidos mostraram que a laje mista foi a estratégia com o maior custo de desconstrução (R\$ 86.113,00), enquanto a pintura das paredes foi a única estratégia cujo custo de desconstrução foi zero.

Em todas as estratégias de projeto o custo da mão de obra foi o que mais incidiu no custo final de desconstrução. O transporte do material até o aterro sanitário pouco incidiu no custo de demolição das diferentes estratégias.

Também na cidade de Curitiba, a laje mista foi a estratégia com o maior custo de desconstrução (R\$ 111.217,00). Em todas as estratégias de projeto o custo da mão de obra foi o que mais incidiu no custo final de desconstrução. O transporte do material até o aterro sanitário pouco influenciou no custo de demolição das diferentes estratégias (Figura 88, Apêndice D).

Em Belém a laje mista continuou sendo a estratégia com o maior custo de desconstrução (R\$ 90.210,00), enquanto a pintura das paredes foi a única estratégia cujo custo de desconstrução foi zero (Figura 89, Apêndice D).

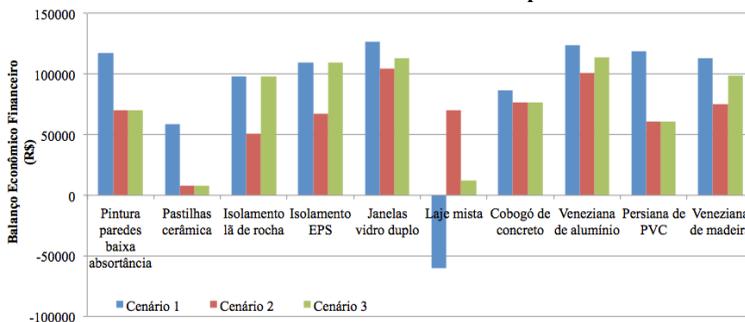
6.1.5.5. Balanço econômico financeiro

Após a avaliação das diferentes fases de custos das estratégias, foi analisado o balanço econômico financeiro. A Figura 52 apresenta o balanço econômico financeiro nos três cenários analisados na cidade de Florianópolis. No cenário 1 as estratégias de projeto obtiveram o melhor balanço econômico financeiro, com exceção da laje mista que obteve balanço negativo. Isso deveu-se à não substituição do forro de PVC na fase de manutenção o que torna, neste cenário, o forro de PVC a melhor solução em comparação com a laje mista. Percebeu-se que o que mais influenciou nos custos finais foram o custo de manutenção e o custo de desconstrução, enquanto o custo inicial representou pequena parcela nos custos totais. Isso deveu-se ao impacto da Inflação dos Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) na Análise de Custo do Ciclo de Vida das diferentes estratégias. Além disso, no balanço econômico financeiro das estratégias das janelas com vidro duplo e da laje mista foi descontado o custo das estratégias existentes no caso base (janelas com vidro simples e forro de PVC, respectivamente) pois foram substituídas, o que causou redução nos custos finais.

O uso de janelas com vidro duplo foi a solução economicamente mais vantajosa no ciclo de vida da edificação estudo de caso. Entre as estratégias de revestimentos externo das paredes, a pintura com baixa absorvância foi a solução economicamente melhor. O isolamento com EPS e a veneziana de alumínio foram as estratégias economicamente mais vantajosas entre as estratégias de isolamento e sombreamento,

respectivamente. mostra o resultado final da ACCV das dez estratégias de projeto utilizadas na edificação residencial de interesse social na cidade de Florianópolis.

Figura 52 – Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos três cenários na cidade de Florianópolis.



Na cidade de Curitiba o uso de janelas com vidro duplo e de venezianas de alumínio foram a solução economicamente mais vantajosa no ciclo de vida da edificação. Entre as estratégias de revestimentos externos das paredes, a pintura com baixa absorvância foi a solução economicamente melhor pois a utilização das pastilhas cerâmicas nas paredes externas obteve resultado economicamente negativo nos cenários 2 e 3. O isolamento de EPS foi a estratégia mais vantajosa entre as duas soluções de isolamento térmico da envoltória da edificação. A substituição da laje mista pelo forro de PVC não foi uma solução economicamente adequada para a edificação no estudo de caso em Curitiba (Figuras 90 e 92, Apêndice D).

Na cidade de Belém as duas estratégias de isolamento térmico foram as soluções economicamente mais vantajosas no ciclo de vida da edificação estudo de caso. Entre as estratégias de revestimentos externos das paredes, a pintura com baixa absorvância foi, novamente, a solução economicamente melhor. Entre as estratégias de sombreamento a veneziana de alumínio foi a estratégia economicamente mais vantajosa (Figuras 91 e 93, Apêndice D).

6.1.6. Análise das estratégias de projeto na edificação estudo de caso através dos quatro parâmetros de sustentabilidade

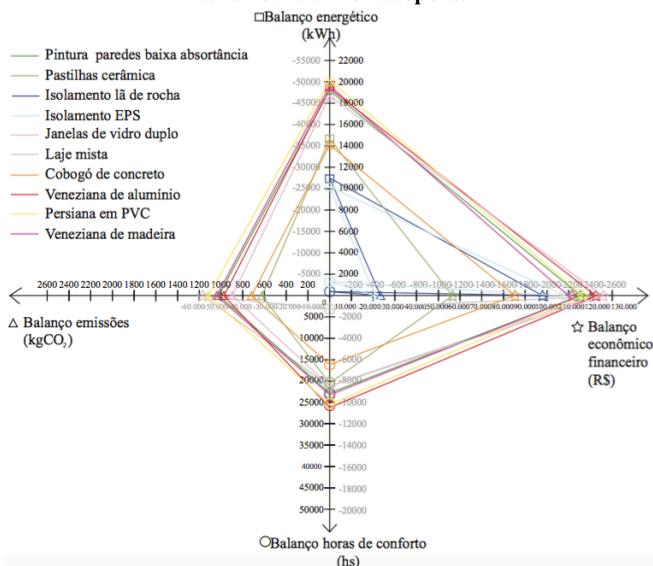
Os quatro parâmetros utilizados foram analisados de forma conjunta para identificar as melhores soluções de projeto para a edificação escolhida.

Esta análise foi realizada para cada cidade nos três cenários de manutenção. Para facilitar a leitura dos resultados, a variação dos mesmos e a fase de reuso na ACVE não foram avaliados.

A Figura 53 apresenta os resultados das estratégias de projeto aplicadas na edificação estudo de caso na cidade de Florianópolis no cenário 1. Neste cenário, como mostrado anteriormente, as estratégias de projeto não foram substituídas durante a vida útil da edificação. Quanto maior a área gerada no gráfico mais a estratégia se mostra adequada à edificação. Os resultados mostraram que, no cenário 1, as estratégias da veneziana de alumínio, da persiana de PVC, da veneziana de madeira, da pintura com baixa absorvância das paredes e das janelas com vidro duplo foram as mais apropriadas para o estudo de caso na cidade de Florianópolis. As demais estratégias não foram tão vantajosas também em comparação com as soluções de projeto presentes no caso base da edificação. Foi o caso, por exemplo, da laje mista que obteve três parâmetros negativos em comparação com forro de PVC presente no caso base da edificação. As duas estratégias de isolamento térmico não representaram a melhor escolha para a edificação estudada, com dois parâmetros com balanço negativo.

Em Curitiba, as estratégias da veneziana de alumínio, da persiana de PVC, da veneziana de madeira, da pintura com baixa absorvância das paredes e das janelas com vidro duplo foram as mais apropriadas para o estudo de caso no cenário 1. As estratégias de isolamento térmico mesmo apresentando ótimo desempenho no conforto térmico e permitindo a redução do consumo energético no ciclo de vida apresentaram balanço negativo das emissões de CO₂, resultando em uma escolha não tão vantajosa em comparação com outras estratégias. Também em Curitiba o uso da laje mista foi uma estratégia não adequada em comparação ao forro de PVC presente no caso base da edificação (Figura 94, Apêndice D).

Figura 53 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 1 em Florianópolis.



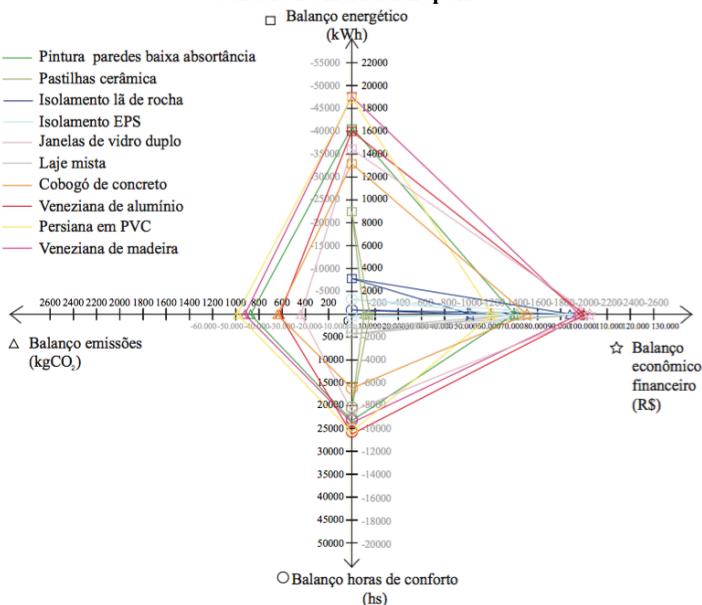
Em Belém os resultados mostraram que as estratégias de isolamento térmico obtiveram o melhor desempenho em três dos quatro parâmetros analisados. No conforto térmico as duas estratégias obtiveram desempenho negativo. Além disso, as estratégias da pintura das paredes externas, a janela com vidro duplo assim como a persiana de PVC, resultaram nas melhores soluções entre as estratégias avaliadas. A estratégia da laje mista, também na cidade de Belém, não resultou em uma solução adequada para o estudo de caso avaliado (Figura 97, Apêndice D).

A Figura 54 apresenta os resultados das estratégias de projeto no cenário 2 na cidade de Florianópolis. Neste caso a estratégia que representou a melhor solução foi a veneziana de madeira, seguida pela persiana de PVC e a veneziana de alumínio. As estratégias que precedentemente resultaram não adequadas continuaram sendo soluções pouco vantajosas para a edificação objeto de estudo. Além disso, percebeu-se que em comparação com o cenário anterior todas as estratégias pioraram seu desempenho em todos os parâmetros (com exceção do parâmetro do conforto que é constante).

Em Curitiba a escolha entre uma ou outra estratégia por parte do projetista, resultou complexa, pois nenhuma das estratégias mostrou-se a melhor nos quatro parâmetros (Figura 95, Apêndice D).

Em Belém as estratégias de isolamento térmico da envoltória continuaram sendo as melhores soluções para o uso da edificação quando condicionada artificialmente. Também neste cenário as estratégias de sombreamento móveis, a pintura das paredes externas assim como as janelas com vidro duplos foram soluções adequadas para o melhor desempenho da edificação. A estratégia da laje mista continuou não sendo uma solução adequada. A escolha da melhor estratégia de sombreamento por parte do projetista se torna complexa, pois nenhuma estratégia obteve desempenho melhor nos quatro parâmetros (Figura 98, Apêndice D).

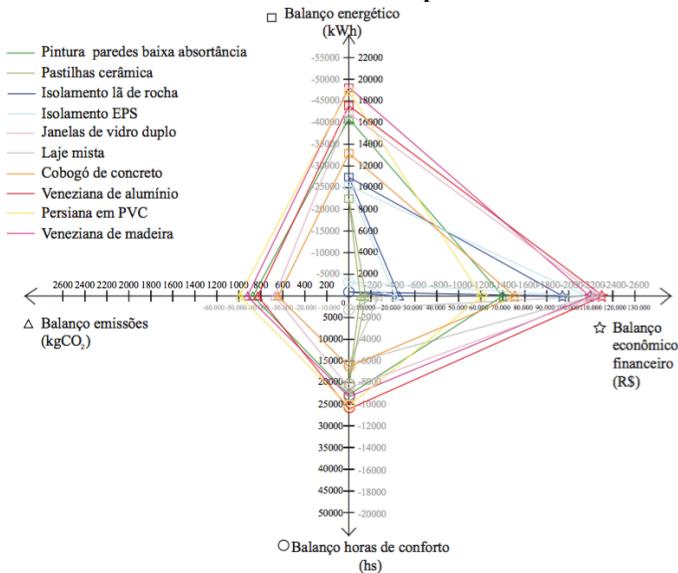
Figura 54 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 2 em Florianópolis.



Na Figura 55 são apresentados os resultados das estratégias de projeto no cenário 3 na cidade de Florianópolis. As três estratégias de sombreamento móveis se confirmaram estratégias de projeto mais

adequadas, seguidas pela janelas de vidro duplos e da pintura das paredes externas. As estratégias de isolamento térmico assim como da laje mista e da pastilhas cerâmicas se comprovaram as piores soluções para o estudo de caso em Florianópolis. As estratégias de isolamento térmico, mesmo obtendo um balanço energético e econômico financeiro positivo, obtiveram um desempenho negativo tanto no parâmetro de conforto quanto das emissões de CO₂.

Figura 55 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 3 em Florianópolis.



Em Curitiba, as três estratégias de sombreamento móveis foram as soluções de projeto mais adequadas nos quatro parâmetros avaliados. As estratégias de isolamento térmico assim como da laje mista foram, na maioria dos parâmetros, as piores soluções de projeto para o estudo de caso em Curitiba (Figura 96, Apêndice D).

Em Belém as estratégias de isolamento térmico da envoltória continuaram sendo as melhores soluções. Também nestes cenários as estratégias de sombreamento móveis, da pintura das paredes externas assim como das janelas com vidro duplo foram soluções adequadas para o melhor desempenho da edificação. A estratégia da laje mista foi a

solução pior. O uso das pastilhas cerâmicas, mesmo apresentando valores positivos em todos os parâmetros, resultou menos vantajosa em comparação a pintura das paredes externas. Da mesma forma o cobogó de concreto foi a solução pior entre as estratégias de sombreamento (Figura 99, Apêndice D).

A avaliação conjunta dos resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros mostrou que não existe uma relação direta entre os diferentes parâmetros. Entre os parâmetros de conforto e energético isso resultou evidente nas estratégias de isolamento térmico, onde se por um lado as estratégias alcançaram ótimo desempenho energético por outro o desempenho no parâmetro de conforto não foi tão satisfatório. Os resultados nos parâmetros energético e das emissões de CO₂ foram os que mais apresentaram semelhanças devido principalmente às bases de dados iniciais dos materiais (energética e das emissões) utilizadas. Enfim, o parâmetro econômico foi o fator que menos se relacionou com os demais parâmetros da sustentabilidade.

Entre as estratégias de projeto avaliadas não foi possível estabelecer e identificar a estratégia com melhor desempenho pois nenhuma delas foi melhor nos quatro parâmetros da sustentabilidade ao mesmo tempo.

6.1.7. Escolha da melhor solução de projeto através do método de tomada de decisão multicritério

Os resultados apresentados revelaram a dificuldade de estabelecer a melhor solução de projeto entre as diferentes estratégias analisadas. Através da aplicação do método de tomada de decisão multicritério foi possível identificar a melhor solução de projeto aplicada na edificação nas três cidades brasileiras.

Antes de se observar os resultados finais são apresentados os resultados obtidos da aplicação do questionário (Apêndice A) ao grupo dos 30 profissionais selecionados para a obtenção do vetor de prioridades dos quatro parâmetros da sustentabilidade (conforto, energético, emissões de CO₂ e econômico). Para chegar a estes valores foram entrevistados 36 profissionais de diferentes áreas da construção civil. O método de decisão multicritério avalia também a consistência das respostas dos entrevistados. Vinte por cento dos questionários foram descartados pois não respeitavam a condição de consistência dos julgamentos. Ao todo, foram utilizados 30 questionários divididos em

igual número entre as três áreas profissionais: projetista, pesquisador/professor e técnico administrativo.

A Tabela 25 apresenta, entre os três diferentes grupos de profissionais, o valor de prioridade dos quatro parâmetros da sustentabilidade para a avaliação das estratégias de projeto através do método proposto na pesquisa.

Tabela 25 – Resultados dos vetores prioridades obtidos através do questionário.

Parâmetros	Profissionais						TOTAL	
	Projetista		Pesquisador		Técnico Administrativo			
	Valor de Prioridade	Prioridade	Valor de Prioridade	Prioridade	Valor de Prioridade	Prioridade	Valor de Prioridade	Prioridade
Conforto	0,254	3	0,306	1	0,213	4	0,258	2
Energético	0,280	2	0,189	4	0,229	2	0,233	3
Emissões	0,101	4	0,292	2	0,218	3	0,204	4
Custo	0,364	1	0,213	3	0,340	1	0,306	1
	CR _m = 0,061<0,1		CR _m = 0,061<0,1		CR _m = 0,035<0,1			

Os resultados mostraram que entre os três grupos de profissionais existe uma percepção diferente da importância dos quatro parâmetros de sustentabilidade. Entre os projetistas o parâmetro que mais influencia as suas escolhas profissionais é o custo, seguido pelo parâmetro energético, de conforto e por último das emissões. Entre os pesquisadores o parâmetro de conforto é considerado o mais importante nas escolhas profissionais, seguido pelo parâmetro das emissões, de custo e por último o parâmetro energético. Enfim, como para os projetistas, o parâmetro de custo resultou no mais relevante nas escolhas profissionais dos técnicos administrativos, seguido pelo parâmetro energético, de emissões e por último de conforto. No final, entre os trinta entrevistados, o parâmetro de custo resultou no mais relevante, com um valor de prioridade de 0,306, seguido pelo parâmetro de conforto, energético e das emissões de CO₂.

Esta análise mostrou que o custo é extremamente relevante nos setores onde este parâmetro influencia as escolhas dos profissionais. No mundo acadêmico este parâmetro apresentou menor relevância havendo outros aspectos mais importantes nas escolhas dos pesquisadores, tais

como conforto ou das emissões de dióxido de carbono. Este método permite definir qual dos parâmetros da sustentabilidade é considerado mais relevante. Nesta pesquisa foi entrevistado um número limitado de profissionais, porém, ainda assim esta amostra evidencia quais são os parâmetros que influenciam as escolhas dos profissionais no campo da construção civil.

Além disso, no questionário foi investigado qual outro parâmetro de impacto ambiental poderia ser incluído na pesquisa para melhor análise dos impactos da construção civil no ambiente. Entre as categorias de impacto elencados no questionário a mais escolhida foi a ocupação do solo, 26 vezes, seguida pelo consumo de energia não renovável, 19 vezes, e pelo consumo de energia renovável, 17 vezes. As categorias de impacto menos escolhidas foram a eutrofização e a oxidação fotoquímica, 3 vezes. A ocupação do solo é um tema particularmente discutido na Itália e por isso de forte interesse entre todos os entrevistados. Os resultados obtidos são limitados a uma pequena região geográfica na Itália. É evidente que em outras regiões, ou até mesmo em outros países, estes resultados podem ser diferentes, sendo influenciados por outros fatores como políticos, econômicos e sociais.

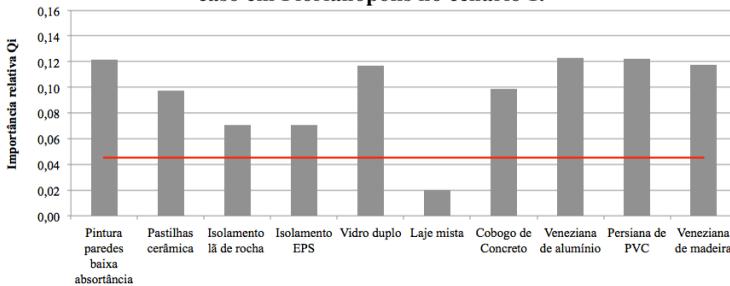
Obtidos os vetores de prioridade dos quatro parâmetros de sustentabilidade utilizados na pesquisa, estes foram utilizados para alcançar o resultado final e escolher a solução de projeto mais adequada aplicada na edificação estudo de caso nas cidades brasileiras. Através do método de tomada de decisão multicritério COPRAS foi possível identificar a melhor solução de projeto. A Figura 56 apresenta o índice de importância relativa Q_i obtido através dos valores de prioridades de cada parâmetro. A melhor solução de projeto para o estudo de caso avaliado na cidade de Florianópolis no cenário 1, ou seja, quando não há a substituição da estratégia de projeto, foi obtido pela veneziana de alumínio de duas folhas de correr, seguida pela pintura das paredes externas com baixa absorvância. A única solução que obteve pior resultado em comparação com o caso real, apresentado com a linha vermelha, foi a laje mista. As outras estratégias de projeto obtiveram melhor resultado em comparação com a solução atualmente utilizada na edificação. No Apêndice D são apresentados todos os resultados com o índice de performance P_i (Tabela 42).

Na cidade de Curitiba a melhor solução de projeto, no cenário 1, foi o isolamento térmico da envoltória com lã de rocha, seguida pela estratégia de isolamento térmico com EPS. Entre as estratégias de

sombreamento a melhor foi a persiana de PVC, enquanto no revestimento das paredes externas foi a pintura com baixa absorvância. A laje mista obteve pior desempenho em comparação com o caso base (Figura 100, Apêndice D).

Na cidade de Belém a melhor solução de projeto, no cenário 1, foi o isolamento térmico da envoltória com EPS, seguida pela estratégia de isolamento térmico com lã de rocha. Em terceiro lugar a estratégia da pintura com baixa absorvância, seguida pela janela com vidro duplo. Entre as estratégias de sombreamento a persiana de PVC e a veneziana de alumínio obtiveram o melhor resultado, apresentando a mesma classificação (5^o). A laje mista continua sendo a estratégia com pior desempenho em comparação com o caso base (Figura 103, Apêndice D).

Figura 56 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Florianópolis no cenário 1.

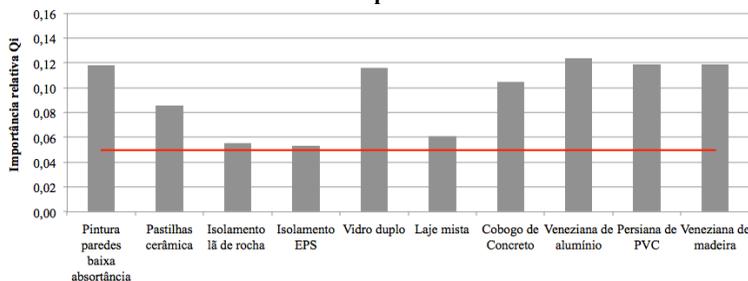


A Figura 57 mostra que a melhor solução de projeto para o estudo de caso avaliado na cidade de Florianópolis no cenário 2 foi obtido novamente pela veneziana de alumínio de duas folhas de correr, seguida pela persiana de PVC. A única solução que obteve pior resultado em comparação com o caso real foi a estratégia da laje mista. Em terceiro lugar a estratégia da pintura com baixa absorvância, seguida pela janela com vidro duplo. As estratégias de isolamento térmico obtiveram resultado praticamente idêntico ao caso atual da edificação (variação de 4%), pouco eficazes no caso estudado.

Na cidade de Curitiba o isolamento térmico da envoltória com lã de rocha continuou sendo a melhor solução seguida pela estratégia de isolamento térmico com EPS. Neste caso todas as estratégias permitem melhorar a sustentabilidade da edificação (Figura 101, Apêndice D).

Em Belém os resultados no segundo cenário foram próximos ao cenário anterior com o isolamento térmico da envoltória com EPS como melhor solução (Figura 104, Apêndice D).

Figura 57 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Florianópolis no cenário 2.

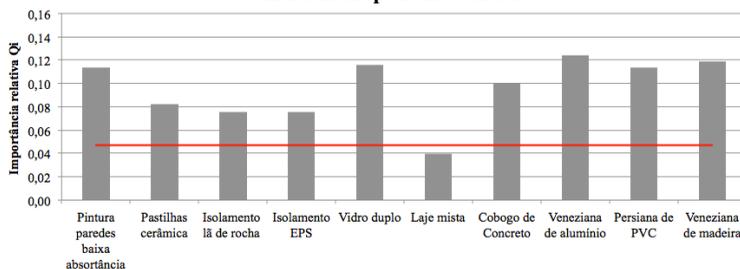


Enfim, a Figura 58 mostra o terceiro cenário dos resultados finais das estratégias de projeto na cidade de Florianópolis. Novamente a veneziana de alumínio de duas folhas de correr continuou sendo a melhor estratégia seguida pela veneziana de madeira e a janela com vidro duplo. A única solução que obteve pior resultado em comparação com o caso base foi a estratégia da laje mista. As estratégias de isolamento térmico obtiveram resultados semelhantes.

Na cidade de Curitiba os resultados obtidos no cenário 3 revelaram que as duas estratégias de isolamento térmico da envoltória com lâ de rocha e com EPS continuaram sendo as duas melhores opções. Também no cenário 3 todas as estratégias permitiram melhorar a sustentabilidade da edificação (Figura 102, Apêndice D).

Em Belém o isolamento térmico da envoltória com EPS, isolamento térmico da envoltória com lâ de rocha e pinturas das paredes externas com baixa absorvância foram as três melhores estratégias (Figura 105, Apêndice D).

Figura 58 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Florianópolis no cenário 3.



Os resultados possibilitam fácil leitura e escolha das estratégias de projeto nos quatro parâmetros da sustentabilidade. Esta avaliação permite identificar com mais facilidade a melhor solução e ao mesmo tempo comparar as diferentes estratégias no caso base da edificação.

6.2. ESTUDO DE CASO NA ITÁLIA

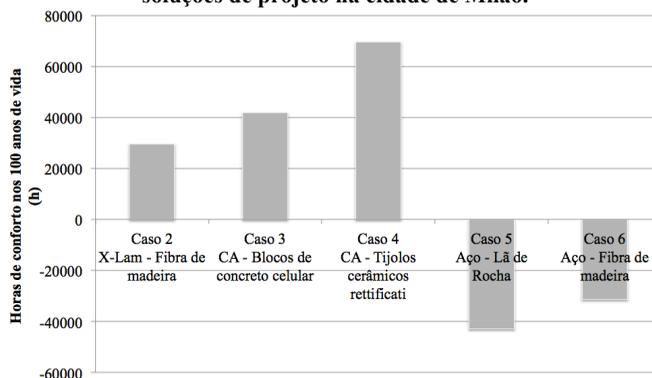
Após a apresentação dos resultados obtidos no estudo de caso nas três cidades brasileiras, são exibidos os resultados do estudo de caso na Itália, avaliado em um único cenário de manutenção. As seis estratégias de projeto avaliadas nos quatro parâmetros são as estratégias que, nas três soluções construtivas, obtiveram o melhor e o pior desempenho na fase inicial da ACVE. Os resultados apresentados são uma síntese dos resultados obtidos no estudo de caso italiano. O Apêndice E apresenta em maior detalhe todos os resultados alcançados.

6.2.1. Conforto térmico

O primeiro parâmetro avaliado nas seis soluções de projeto foi do conforto térmico.

A Figura 59 apresenta as horas de conforto nos 100 anos de vida da edificação em comparação com o caso real. O caso 4 foi a solução que obteve o melhor resultado com incremento de 69525 horas de conforto em comparação com o caso real, enquanto o caso 5, com resultado negativo de -42927 horas, obteve o pior desempenho.

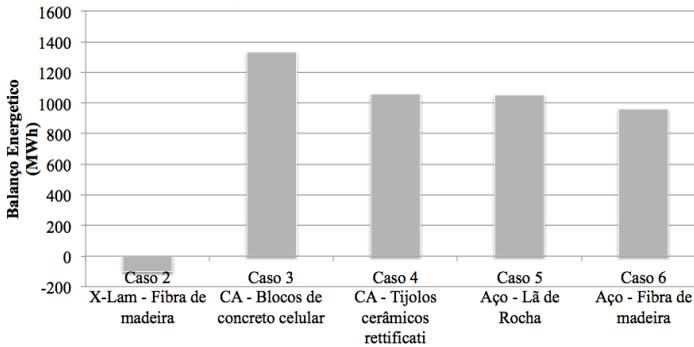
Figura 59 – Balanço das horas de conforto da edificação com as diferentes soluções de projeto na cidade de Milão.



6.2.2. Parâmetro energético

A Figura 60 apresenta os resultados do balanço energético das diferentes soluções de projeto aplicadas na edificação estudo de caso. Os resultados mostraram que a única solução de projeto que obteve um balanço energético negativo foi a estrutura em X-Lam com isolamento em fibra de madeira. A grande quantidade do material X-Lam assim como o seu valor de energia embutida, gerou um balanço energético negativo na edificação. A melhor solução no parâmetro energético foi a edificação com estrutura de concreto armado e envoltória em blocos de concreto celular, com balanço energético positivo de 1332 MWh, seguida pela solução de projeto em concreto armado com paredes externas de tijolos cerâmicos *rettificati*, com balanço de 1058 MWh. Também as duas soluções de projeto em aço obtiveram um bom desempenho na ACVE da edificação com balanço positivo de 1051 MWh e 960 MWh, respectivamente, para o caso 5 e 6. Os resultados apresentados não contemplam a variabilidade de resultados devido a diferentes bases de dados utilizada e a distância de transporte, assim como o potencial de reciclagem. Estes fatores podem alterar os resultados finais das diferentes soluções de projeto, por isso é importante analisar também estas variáveis na escolha da melhor estratégia de projeto.

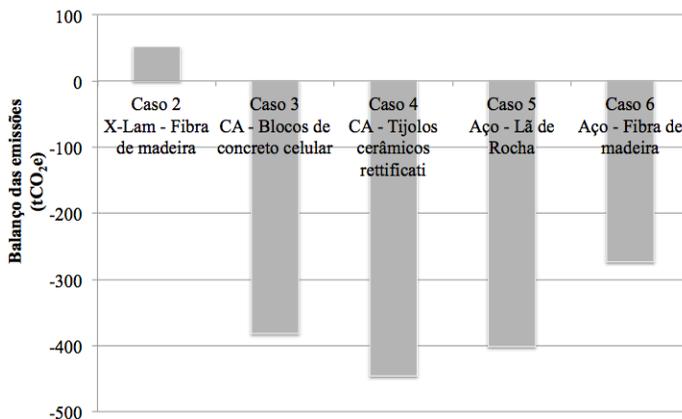
Figura 60 – Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão.



6.2.3. Parâmetro das emissões de CO₂ equivalente

A Figura 61 apresenta os resultados finais do balanço das emissões de CO₂e da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão. Os resultados mostraram que a única solução de projeto que reduziu as emissões de CO₂e, em comparação com o caso real, foi o caso 2, estrutura em X-Lam com isolamento térmico em fibra de madeira, com 52 tCO₂e não propagadas no meio ambiente. As outras estratégias obtiveram um balanço das emissões negativo, gerando uma quantidade de CO₂e maior que no caso real. As soluções de projeto com estrutura em X-Lam representaram a alternativa melhor em comparação com os demais casos. Em relação a ACVE, os resultados apresentaram diferenças significativas. Enquanto na avaliação do ciclo de vida energético a única estratégia que obteve balanço energético negativo foi o caso 2, na ACCO₂A a solução de projeto em X-Lam e isolamento com fibra de madeira foi a única a obter balanço positivo. Esse resultado comprova que nem sempre o parâmetro energético e de emissões apresentam uma análise ambiental semelhantes.

Figura 61 – Balanço das emissões CO₂e da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão.

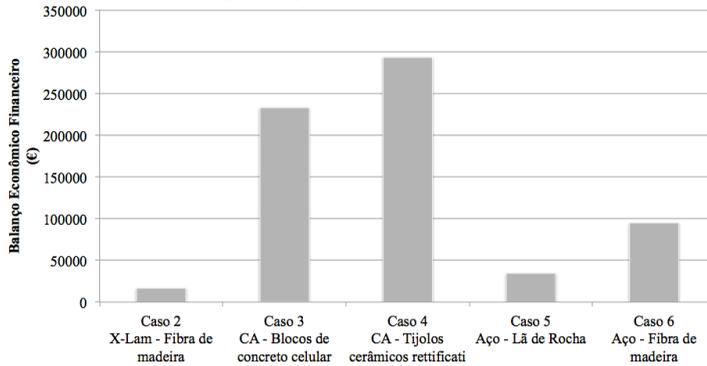


6.2.4. Parâmetro de custo

O último parâmetro avaliado foi o econômico financeiro através da ACCV. A Figura 62 apresenta o balanço econômico financeiro das soluções de projeto em comparação com o caso 1 (caso real da edificação).

Todas as soluções de projeto aplicadas na edificação obtiveram um balanço econômico financeiro positivo em comparação com o caso real. O caso 4 da edificação, com tijolos cerâmicos *rettificati*, obteve o melhor desempenho com balanço econômico positivo de aproximadamente € 300.000,00, enquanto o caso 2 obteve o pior resultado com balanço positivo de € 16.500,00. As soluções de projeto convencionais, com estrutura em concreto armado, apresentaram um melhor balanço econômico em comparação com as demais soluções de projeto.

Figura 62 – Balanço econômico financeiro da edificação com as diferentes estratégias de projeto na cidade de Milão.

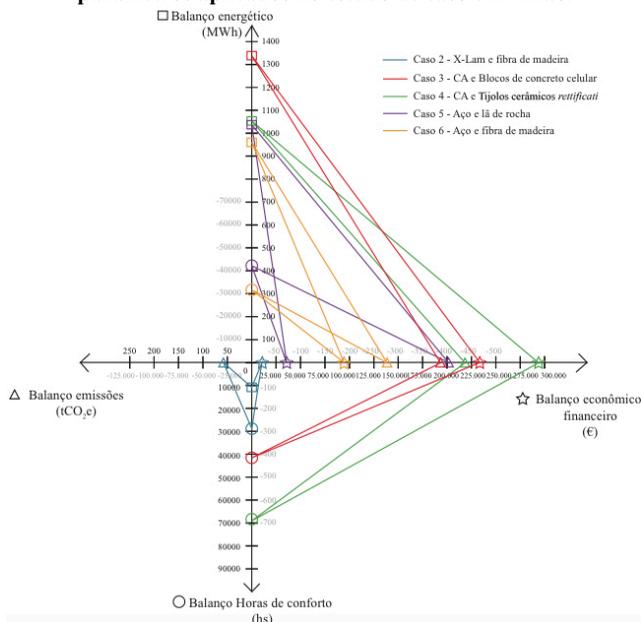


6.2.5. Análise das estratégias de projeto através dos quatro parâmetros de sustentabilidade

Os quatro parâmetros utilizados na avaliação das soluções de projeto na edificação foram avaliados de forma conjunta para identificar as melhores soluções em comparação com o caso base da edificação. A Figura 63 apresenta os resultados das cinco soluções de projeto aplicadas na edificação estudo de caso comparadas com o caso real (caso 1).

No balanço energético, o caso 3 da edificação obteve o melhor desempenho em comparação com o caso base e as outras soluções de projeto. Por outro lado no balanço das emissões de CO₂ a solução de projeto em concreto armado e blocos de concreto celular obteve resultado negativo em comparação com o caso real. No balanço econômico financeiro e nas horas de conforto, o caso 3 obteve resultado positivo mas não foi a melhor solução. Neste dois parâmetros o caso 4, estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati*, alcançou o melhor resultado, mas obteve um resultado negativo nas emissões de CO₂. Neste parâmetro somente o caso 2 conseguiu um balanço positivo, melhorando o desempenho do caso 1 (caso base da edificação) nas emissões. Apesar disso, a solução de projeto em X-Lam e fibra de madeira apresentou balanço energético negativo em comparação com o caso 1. Os casos 5 e 6, com estrutura em aço, foram os únicos que obtiveram dois parâmetros negativos, nas horas de conforto e no balanço das emissões, em comparação com o caso real.

Figura 63 – Resultados das cinco soluções de projeto nos quatro parâmetros aplicados no estudo de caso em Milão.



Dessa primeira análise concluiu-se que a seleção da melhor solução de projeto não é imediata pois os resultados dos parâmetros analisados não apontam diretamente para uma escolha final. Por esta razão a avaliação multicritério foi utilizada como método final que permitiu a escolha da melhor solução segundo os parâmetros aplicados na avaliação.

6.2.6. Escolha da melhor solução de projeto através do método de tomada de decisão multicritério

Através da aplicação do método de tomada de decisão multicritério foi possível identificar a melhor solução de projeto aplicada na edificação estudo de caso na Itália.

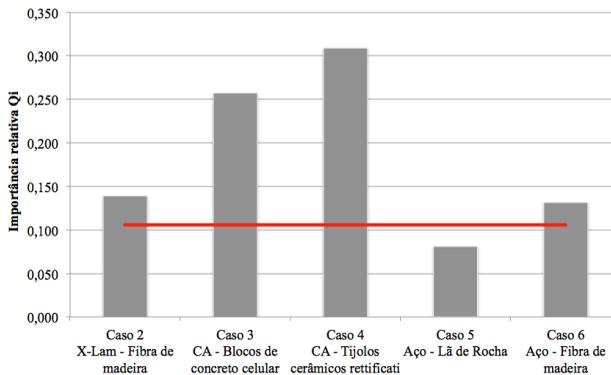
A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos nas soluções de projeto nos quatro parâmetros da sustentabilidade com o relativo valor de prioridade.

Tabela 26 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros de sustentabilidade na edificação em Milão.

Parâmetros	Unidade	Valor de Prioridade	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Conforto	hs	0,258	29602	41847	69525	-42928	-31350
Energético	MWh	0,233	-104	1333	1058	1051	961
Emissões	tCO ₂ e	0,204	52	-382	-446	-401	-274
Custo	€	0,306	16.554	232.887	293.125	34.489	94.822

Através do método de tomada de decisão multicritério COPRAS foi possível identificar a melhor solução de projeto. Como apresentado na Figura 64, a melhor solução de projeto para o estudo de caso avaliado em Milão foi o caso 4, com estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati* nas paredes externas. A única solução que obteve pior resultado em comparação com o caso real (caso 1) foi o caso 5, com estrutura em aço e isolamento térmico em lã de rocha. As outras soluções obtiveram melhores resultados em comparação com a solução atualmente utilizada na edificação.

Figura 64 – Importância relativas Q_i das estratégias de projeto no estudo de caso em Milão.



Através do índice de Performance P_i (Tabela 27) obteve-se a classificação das soluções de projeto.

Tabela 27 – Resultados finais dos Índices P_i e Q_i das estratégias de projeto na edificação em Milão.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Importância relativa Q_i	0,106	0,139	0,257	0,309	-0,081	0,131
P_i - Índice de performance	34,2%	45,0%	83,3%	100,0%	26,3%	42,5%
Classificação	5	3	2	1	6	4

Estes resultados demonstraram que através de um método baseado na avaliação da sustentabilidade das estratégias de projeto pode-se reduzir os impactos da construção civil no ambiente escolhendo as soluções mais adequadas.

7. CONCLUSÕES

A pesquisa propôs um método para a escolha das estratégias de projeto nas edificações com base nos três pilares da sustentabilidade: econômico, ambiental e social. Os quatro parâmetros escolhidos (conforto, energético, emissões de CO₂ e custos) permitiram avaliar as estratégias de projeto no ciclo de vida, aplicadas nas edificações considerando os efeitos das mudanças climáticas. Este método teve como objetivo a identificação das estratégias mais adequadas não somente energeticamente mas também do ponto de vista sustentável. Para alcançar os objetivos propostos na pesquisa foram avaliadas duas edificações residenciais diferentes por tipologia e localização. De um lado, uma residência unifamiliar de interesse social situada em três cidades brasileiras e por outro lado um edifício multifamiliar de interesse social avaliado na cidade de Milão, na Itália. A aplicação do método proposto em países diferentes teve como objetivo demonstrar a sua aplicabilidade em diferentes contextos geográficos, evidenciando as diferenças energéticas, econômicas e sociais obtidas por meio de uso de um método baseado em conceitos sustentáveis. Ao mesmo tempo, a escolha de duas edificações diferentes, mesmo residenciais, evidencia como o método utilizado pode ser empregado para a avaliação de qualquer edificação. As estratégias de projeto aplicadas nas edificações foram escolhidas através da análise das principais soluções de projeto utilizadas na construção civil. Para a edificação avaliada na Itália, as soluções de projeto foram identificadas após análise das mais recentes edificações de interesse social multifamiliares construídas no país. No estudo de caso brasileiro foram avaliadas algumas das principais estratégias de projeto utilizadas em edificações residenciais, analisadas separadamente. Diferente do estudo de caso brasileiro, na edificação italiana foram avaliadas seis soluções de projeto que combinam diversas estratégias aplicadas ao mesmo tempo no edifício. Outro aspecto que diferencia significativamente os dois estudos de caso é que se na edificação brasileira as estratégias apresentaram desempenho energético diferente na fase operacional, no estudo de caso em Milão, as seis soluções de projeto aplicadas na edificação apresentaram desempenho energético muito parecido. Isso deveu-se a utilização da mesma transmitância na envoltória nas seis soluções de projeto, de modo a verificar a melhor estratégia nos quatro parâmetros do método. Através da aplicação das estratégias nas edificações foi possível comparar o comportamento das mesmas com e sem estratégias nos quatro

parâmetros, para verificar a real necessidade do uso da estratégia. Para fazer isso, o método foi composto de várias etapas, a partir da análise dos efeitos das mudanças climáticas nas edificações.

Os efeitos das mudanças climáticas ficaram evidentes na análise das condições climáticas futuras das quatro cidades onde as edificações foram avaliadas. As três cidades brasileiras apresentarão importante aumento da temperatura externa e da radiação global horizontal até 2080, em comparação com as condições atuais. Na cidade de Belém, a mais quente, estas mudanças foram mais significativas e provocarão efeitos expressivos também no desempenho termoenergético das edificações. O aumento da demanda de energia para resfriamento, nas três cidades, provocará também redução das horas de conforto térmico, gerando maior sensação de desconforto do usuário. Também no estudo de caso Italiano ficaram evidentes os efeitos das mudanças climáticas. Em Milão, em 2080, as mudanças climáticas provocarão aumento da temperatura média e da radiação direta global e redução na umidade média, em comparação com o ano de 2017. Estas alterações climáticas provocarão efeitos significativos também no desempenho termoenergético das edificações. No estudo de caso em Milão as horas de desconforto por frio, em 2080 representarão 35% das horas totais de desconforto em comparação com o atual 65%. Por outro lado, as horas de desconforto por calor serão as principais causas de desconforto para o usuário em 2080. Também no consumo para a climatização interna dos apartamentos da edificação em Milão, os seis estudos de caso mostraram que, se por um lado o consumo para aquecimento em 2080 diminuirá 50% em comparação com o consumo atual, por outro lado o consumo para resfriamento aumentará de forma significativa em até 53%. Os resultados obtidos mostram a importância de se considerar os efeitos das mudanças climáticas nas escolhas projetuais, assim como na avaliação da eficiência energética das edificações. Esta análise resulta ainda mais importante quando se aplica o método de ACV nas edificações que apresentam vida útil de várias décadas. Outro aspecto relevante é relacionado aos arquivos climáticos utilizados para as simulações termoenergéticas. A atualização constante dos arquivos climáticos é fundamental para a obtenção de resultados de simulações computacionais mais reais em relação às condições climáticas atuais.

Para cada parâmetro utilizado no método foi realizada uma análise detalhada capaz de apontar a importância da avaliação multicritério na escolha das melhores soluções de projeto nas edificações.

O primeiro parâmetro avaliado foi o conforto térmico que, em uma abordagem sustentável, foi considerado como parâmetro social. Através do método do conforto adaptativo foi possível avaliar as horas de conforto do usuário nas edificações com e sem as estratégias de projeto. No Brasil, o estudo de caso com as diferentes soluções de projeto, apresentou resultados diferentes nas três cidades avaliadas. Isso demonstra que a escolha adequada das soluções de projeto deve passar por uma atenta análise das condições climáticas. Assim, estratégias de projeto que se mostraram eficazes em determinadas cidades se mostraram ineficazes em outras. É o caso, por exemplo, das duas estratégias de isolamento térmico que nas cidades de Curitiba permitiram melhorar o conforto térmico do usuário, enquanto nas outras duas cidades obtiveram desempenho negativo. Os efeitos das mudanças climáticas, como observado anteriormente, afetaram de forma significativa o parâmetro de conforto. Em uma cidade como Belém, uma das cidades mais quentes do Brasil, o uso de estratégias de projeto em condições da edificação naturalmente ventilada, não permitirão melhora significativa dos níveis de conforto térmico até 2080. No estudo de caso aplicado na Itália, os resultados mostraram que as diferentes soluções de projeto aplicadas na edificação apresentaram desempenho diferente apesar da mesma transmitância térmica. As soluções de projeto com estrutura em concreto armado alcançaram melhor desempenho em comparação com as soluções em estrutura em X-Lam e em aço. A maior massa térmica do edifício, com as paredes em alvenaria e concreto, permitiram alcançar melhor desempenho, aumentando as horas de conforto do usuário ao longo dos 100 anos de vida da edificação. Por outro lado, a menor capacidade térmica das paredes externas das soluções em aço provocaram pior desempenho nas duas soluções de projeto em comparação com os demais casos avaliados. O estudo de caso real obteve desempenho mediano.

No parâmetro energético as soluções de projeto foram avaliadas através da ACVE considerando diferentes bases de dados, tanto no estudo de caso brasileiro quanto no estudo de caso italiano. Os resultados alcançados mostraram que a escolha da base de dados pode influenciar o resultado final da pesquisa. As diferentes distâncias de transporte não alteraram de forma significativa o balanço energético final das estratégias de projeto. A fase inicial representou, em todas as soluções de projeto, a fase com a maior incidência no ciclo de vida energético das estratégias. A fase de manutenção foi também uma etapa relevante no ciclo de vida energético das estratégias. Isto ficou mais

evidente no estudo de caso brasileiro, onde foram avaliados três diferentes cenários de manutenção. A simples manutenção ordinária das estratégias de projeto sem a substituição das mesmas, reduziu notavelmente a energia consumida em comparação com os outros cenários. Por outro lado, a fase de desconstrução representou a menor parcela da energia consumida no ciclo de vida. A fase de reuso, avaliada exclusivamente a título informativo, representou uma importante solução para reduzir o consumo de energia gerado pela produção de novos materiais da construção civil. Ao mesmo tempo o reuso dos materiais reduziu o impacto ambiental provocado pela deposição dos mesmos em aterro sanitário.

No parâmetro das emissões de dióxido de carbono os dois estudos de casos foram avaliados através de bases de dados mais próximas da realidade local. Por esta razão, no estudo de caso brasileiro foi utilizada uma única base de dados nacional não havendo mais dados para serem aproveitados. No estudo de caso italiano, as soluções de projeto foram avaliadas utilizando três base de dados na fase embutida e três distâncias de transporte. As diferentes bases de dados, também no parâmetro das emissões, alterou os resultados finais, mostrando novamente a importância da escolha adequada das bases de dados utilizadas na pesquisa. A fase inicial foi a que mais incidiu nas emissões finais das estratégias de projeto, enquanto a fase de demolição, como observado, apresentou uma parcela pequena no ciclo de vida. A fase de manutenção apresentou uma parcela mais significativa no ciclo de vida das soluções de projeto ainda mais quando houve substituição da estratégia ao longo da vida útil da edificação. No estudo de caso brasileiro as estratégias de projeto obtiveram resultados diferentes nas três cidades. Estratégias de isolamento térmico, laje mista e revestimento das paredes externas em pastilhas cerâmicas obtiveram balanço negativo das emissões na maioria das cidades. No estudo de caso em Milão, as soluções com estrutura em X-Lam apresentaram a melhor solução de projeto na edificação, enquanto a madeira da estrutura portante apresentou quantidade inferior de emissões embutidas em comparação com as demais soluções projetuais. Este indicador demonstrou que o caso real da edificação pode ser considerado uma ótima solução para reduzir os impactos ambientais devido às emissões de CO₂e.

A correta escolha da base de dados, tanto energética como das emissões de CO₂, é fundamental para se obter resultados mais próximos da realidade. Bases de dados nacionais e suas constantes atualizações

são fundamentais para a avaliação correta do ciclo de vida nas edificações.

Enfim, o parâmetro de custo representou o último pilar da abordagem sustentável do método. Através da ACCV as estratégias de projeto foram avaliadas no ciclo de vida, considerando as mudanças do cenário econômico no futuro. Os dois estudos de caso, brasileiro e italiano, apresentaram resultados diferentes entre si, devido à situação econômica diferenciada entre os dois países, mas também devido às características das estratégias de projeto e nas tipologias de edificações escolhidas. Na Itália, os resultados mostraram que a mão de obra representou uma parcela significativa no balanço econômico no ciclo de vida. Em comparação com os parâmetros energético e de emissões, onde a mão de obra da estratégia não apresentou grande importância no ciclo de vida, no parâmetro econômico essa representou até 40% dos custos finais. No Brasil, o custo da estratégia foi o que mais influenciou o custo final no ciclo de vida na maioria das estratégias. Além disso, a fase de manutenção e de demolição das estratégias de projeto no Brasil apresentaram o custo maior nas diferentes fases de vida da edificação, devido principalmente ao elevado índice de inflação dos preços ao consumidor amplo, utilizado para determinar os custos futuros. No estudo de caso brasileiro, entre as três cidades avaliadas também observou-se diferença nos preços, sendo Belém a cidade mais cara para os materiais da construção. Todas as estratégias aplicadas na edificação alcançaram balanço financeiro positivo nas diferentes cidades. Na Itália a solução de projeto em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati* alcançou o melhor balanço econômico financeiro em comparação com o caso real da edificação. No ciclo de vida a escolha mais adequada reduziu os custos em até 20% em comparação com o custo inicial. Este elemento demonstrou que a simples avaliação dos custos iniciais não é suficiente para a escolha da melhor solução de projeto no parâmetro econômico.

Os resultados obtidos nas diferentes soluções de projeto nos quatro parâmetros não permitiram a escolha da melhor estratégia para a edificação. A avaliação conjunta dos diferentes parâmetros demonstrou que não existe uma solução de projeto que possa ser considerada a mais adequada em todos os parâmetros. Este resultado também demonstra que não existe uma relação direta entre os quatro parâmetros avaliados. O uso do método de tomada de decisão multicritério permitiu facilitar e direcionar a escolha das melhores soluções de projeto. O questionário aplicado aos trinta profissionais da construção civil mostrou que a

importância dos parâmetros avaliados é diferente dependendo da área de atuação de cada um. O parâmetro econômico foi considerado o mais relevante para os projetistas e os técnicos administrativos, enquanto para os pesquisadores/docentes o parâmetro de conforto resultou o mais importante em suas escolhas profissionais. Este resultado mostrou que o aspecto econômico continua sendo o mais relevante, mas que ao mesmo tempo, os parâmetros energéticos e de bem-estar do usuário estão se tornando cada vez mais importantes nas escolhas dos profissionais. Isso mostrou uma clara evolução do pensamento no campo da construção civil, devido à maior conscientização para a preservação do meio ambiente. Por meio do método de tomada de decisão multicritério foi possível determinar as estratégias mais adequadas nos dois estudos de casos aplicados na Itália e no Brasil. Na edificação italiana a estratégia mais adequada foi a solução com estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati*, seguida pela estrutura em concreto armado e blocos cerâmicos. Entre o caso real da edificação e as soluções de projeto com estrutura em aço os resultados não apresentaram diferenças significativas podendo ser consideradas soluções complementares. Os resultados finais mostram que a solução de projeto mais consolidada no território Italiano foi a estratégia mais adequada—para a edificação avaliada. No Brasil, o estudo de caso apresentou resultados diferentes nas três cidades, mostrando como a escolha da melhor estratégia de projeto é sensível às condições climáticas do lugar assim como aos aspectos econômicos. Na cidade de Curitiba a melhor estratégia de projeto foi o isolamento com lã de rocha, seguida pela veneziana de madeira e da pintura das paredes externas com baixa absorvância. Em Florianópolis a melhor estratégia de projeto foi a veneziana de alumínio, seguida pela pintura das paredes externas com baixa absorvância e das janelas com vidro duplo. Enfim, em Belém o isolamento em EPS, a pintura com baixa absorvância das paredes e as janelas em vidro duplo foram, na ordem, as estratégias mais adequadas.

Foram avaliadas exclusivamente duas categorias de impacto ambientais no ciclo de vida das edificações. Como apresentado em diversas pesquisas internacionais, foram escolhidas as categorias de impacto mais utilizadas no setor da construção civil, a demanda de energia e o aquecimento global (emissões de CO₂). É evidente que a escolha de outras categorias de impacto podem modificar a escolha das estratégias de projeto. No Apêndice F são apresentados os resultados das seis soluções de projeto avaliadas no estudo de caso na Itália através da categoria de impacto do potencial de acidificação. Os resultados obtidos

mostraram que, nesta categoria de impacto, as melhores soluções foram os casos com estrutura em X-Lam seguidos pelo caso com estrutura em blocos de concreto. Esta outra leitura do impacto ambiental mostrou a importância de analisar as estratégias de projeto com outras categorias de impacto para se analisar de forma mais completa as diferentes soluções de projeto.

O método apresentado mostrou a importância da avaliação das estratégias de projeto através de uma metodologia multicritério que permita analisar as soluções de projeto segundo uma visão sustentável. A simples avaliação da energia consumida na fase operacional, por exemplo, teria condicionado outra escolha entre as demais soluções de projeto avaliadas nos dois estudos de caso. Este método permite investigar o comportamento das estratégias de projeto de forma mais precisa, por meio de simulações computacionais termoenergéticas voltadas especificamente para o projeto. Além disso, mesmo com algumas limitações, foram considerados os efeitos futuros das mudanças climáticas e dos aspectos econômicos nas edificações. Em um produto com vida útil de várias décadas, como um edifício, estes elementos são de fundamental importância em um método apoiado na avaliação do ciclo de vida. O método se propõe como instrumento para auxiliar os profissionais da construção civil na escolha das estratégias de projeto através de uma ótica sustentável, que permita minimizar os impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida do usuário.

7.1. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa apresentou algumas limitações que estão descritas na sequência:

- Na pesquisa foram avaliadas somente duas edificações residenciais de interesse social. Para aprimorar o método proposto, diferentes tipologias de edificações tanto residenciais quanto comerciais poderiam ser avaliadas.
- Os estudos de casos propostos foram analisados em três cidades brasileiras e uma cidade italiana. A escolha de mais cidades com diferentes condições climáticas pode permitir a obtenção de resultados diferentes nas mesmas tipologias edilícias.
- Na avaliação dos efeitos das mudanças climáticas no desempenho térmico e energético das diferentes soluções de projeto nos dois estudos de caso foi utilizado somente o cenário A2 do IPCC.

Através da avaliação de outros cenários das mudanças climáticas é possível obter resultados diferentes.

- No estudo de caso italiano, um único cenário de manutenção foi utilizado para avaliar as soluções de projeto. Como observado no estudo de caso brasileiro, os diferentes cenários modificam de forma significativa os resultados finais.
- A avaliação da fase de reuso foi analisada somente em alguns dos quatro parâmetros da sustentabilidade propostos na pesquisa. A falta de dados de caráter econômico, mas também das emissões de CO₂, no Brasil, limitaram a avaliação dessa fase do ciclo de vida. Por esta razão foi apresentada a título informativo.
- As simulações termoenergéticas foram realizadas somente com um tipo de comportamento do usuário. O uso diferente das duas edificações pode modificar o consumo para aquecimento e resfriamento das edificações.
- Na avaliação das estratégias de projeto foi considerado exclusivamente um único parâmetro social, ou seja, as condições de conforto térmico do usuário.
- Na avaliação da ACV somente duas categorias de impacto ambiental foram analisadas. Os resultados apresentados no Apêndice E, assim como a revisão bibliográfica, demonstrou que a Avaliação do Ciclo de Vida pode considerar outras categorias de impactos de grande relevância.
- Na avaliação da ACVE, no estudo de caso brasileiro, foi utilizada uma base de dados internacional comparada com os dados encontrados na literatura nacional. A falta de uma base de dados nacional consistente é uma grande limitação para todas as pesquisas em matéria de ACVE.
- Na avaliação das emissões de CO₂ no estudo de caso brasileiro foram utilizados dados nacionais de uma única base de dados, o que não permitiu avaliar variações nos resultados finais. Também neste caso há a necessidade de uma base de dados sólida e que apresente valores de emissões expressos em CO₂ equivalente.
- Para avaliação dos custos no ciclo de vida das estratégias de projeto nos dois estudos de caso, as duas bases de dados utilizadas (SINAPI e *Camera di Commercio di Milano*) apresentaram algumas limitações. Por esta razão, em alguns casos, os valores foram obtidos com base nos preços dos fornecedores.

- Na avaliação do método de tomada de decisão multicritério, somente 30 profissionais na região de Milão foram considerados na aplicação do questionário. Com um maior número de entrevistados e em contextos geográficos diferentes o resultado do questionário poderia ser diferente.
- Na avaliação final das estratégias de projeto por meio do método de tomada de decisão multicritério, no estudo de caso brasileiro, foram utilizados os resultados obtidos no questionário aplicado na Itália. Estes resultados poderiam ser diferentes com a aplicação dos questionários a profissionais brasileiros.

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com as limitações levantadas, as sugestões para trabalhos futuros são:

- Desenvolvimento e constante atualização dos arquivos climáticos utilizados nas simulações termoenergéticas, de acordo com as condições climáticas locais.
- Aplicação de outros cenários de emissões propostos pelo IPCC nos estudos de casos propostos na pesquisa.
- Aplicação do método proposto em mais estudos de casos e em diferentes condições climáticas.
- O método proposto deve ser validado, por exemplo através de uma consulta a um painel de especialistas com base no Método *Delphi*.
- Aplicação de outras estratégias de projeto nos estudos de caso propostos.
- Desenvolvimento de uma base de dados nacional referente aos materiais da construção civil tanto de energia embutida quanto de emissões de carbono equivalente iniciais.
- Aplicação de diferentes padrões de uso das edificações propostas na pesquisa.
- Uso de outros indicadores de impacto ambiental para a avaliação do aspecto ambiental no método proposto nesta tese.
- Aplicação do questionário utilizado na pesquisa a uma amostra maior de profissionais, em contextos sociais, econômicos e climáticos diferentes.
- Criação de uma ferramenta computacional que permita aplicar o método proposto de forma mais simples e imediata. Dessa forma

será possível disponibilizar ao projetista uma ferramenta que possa facilitar a escolha de estratégias de projeto mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABEYSUNDRA, U.G.Y.; BABEL, S.; GHEEWALA, S. Environmental, economic and social analysis of materials for doors and windows in Sri Lanka. **Building and Environment**, v. 42, n. 5, p.2141-2149, 2007.

ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of buildings: a method. **Building and Environment**, v. 32, n. 4, p. 317-320, 1997.

AKTAS, C.; BILEC, M. Impact of lifetime on US residential building LCA results. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 337–349, 2012.

ALBATAYNEH, A; ALTERMAN, D.; PAGE, A.; MOGHTADERI, B. Assessment of the Thermal Performance of Complete Buildings Using Adaptive Thermal Comfort. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 216, p. 655-661, 2016.

AMAN, M.; JAMSON, B; MOKHILIS, H; BAKAR, A. Analysis of the performance of domestic lighting lamps. **Energy Policy**, v. 52, n. 1, p. 482–500, 2013.

AMATO, A; RUTH, M.; KIRSHEN, P.; HORWITZ, J. Regional energy demand responses to climate change: methodology and application to the Commonwealth of Massachusetts, **Climat Change**, v. 71, p. 175–201, 2005.

ANAND, C; AMOR, B; 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 408–416, 2017.

ANDRADE, T.F.R. **Integração da análise ciclo de vida nas práticas de projetos de edifícios**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2013.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifas da Classe de Consumo das Concessionárias**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes /tarifaAplicada/index.cfm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm). Acesso em: 02 mar. 2015.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Fatores de Conversão**. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_fatoresdeconversao_indice.pdf. Acesso em: 02 mai. 2017.

ARDENTE, F.; BECCALI, M.; CELLURA M.; MISTRETTA, M. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. **Renewable Sustainable Energy Rev**, v.15, p. 460–470, 2011.

ASHRAE. **ASHRAE STANDARD 90.1**. American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. Atlanta: 1999.

ASHRAE. **ASHRAE STANDARD 55**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: 2013.

ASIF, M.; MUNEEER, T; KELLEY, R. Life Cycle Assessment: a case study of a dwelling home in Scotland. **Building and Environment**, v. 42, n. 3, p. 1391-1394, 2007.

ASSAF, S.; NOUR, M. Potential of energy and water efficiency improvement in Abu Dhabi's building sector – Analysis of Estidama pearl rating system. **Renewable Energy**, v. 82, p. 100-107, 2015.

ASSEFA, G.; AMBLER, C. To demolish or not to demolish: Life cycle consideration of repurposing buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 28, p. 146-153, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5674: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações—Anexo D**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

ATMACA, A.; ATMACA, N. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO₂A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Buildings**, v.102, p.417-431, 2015.

AUTORITÁ PER L'ENERGIA ELETTRICA IL GAS E IL SISTEMA IDRICO. **Andamento del prezzo dell'energia elettrica per un consumatore domestico tipo in maggior tutela**.. Disponível em: <http://www.autorita.energia.it/it/dati/eep35.htm>. 2017.

AYE, L.; NGO, T.; CRAWFORD, R.H.; GAMMAMPILA, R; MENDIS, P. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. **Energy and Buildings**, v.47, n.11, p.159-168, 2012.

BALL, J.; SRINIVASAN, V. Using the analytic hierarchy process in house selection. **Real Estate Finance and Economics**, v.9, p. 69–85, 1994.

BANANI, R.; VAHDATI, M.; SHAHRESTANI, M.; CROOME, D.C. The development of building assessment criteria framework for sustainable non-residential buildings in Saudi Arabia. **Sustainable Cities and Society**, v.26, p. 289–305, 2016.

BANSAL, D.; SINGH, R; SAWHNEY, R. Effect of construction materials on embodied energy and cost of buildings—A case study of residential houses in India up to 60 m² of plinth area. **Energy and Buildings**, v. 69, n. 4, p. 260-266, 2014.

BECCALI, M.; CELLURA, M; FONTANA, M.; LONGO, S.; MISTRETTA, M. Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, n. 5, p. 283-293, 2013.

BELLIA, L.; DE FALCO, F.; MINICHELLO, F. Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates. **Applied Thermal Engineering**, v. 54, n. 2, p. 190-201, 2013.

BENDER, A.; DIN, A.; HOESLI, M.; BROCHER, S. Environmental preferences of homeowners: further evidence using the AHP method. *Journal of Property*. **Investment and Finance**, v.18, p. 445-455, 2000.

BERGER, T.; AMANN, C.; FORMAYER, H.; KORJENIC, A.; POSPISCHAL, B.; NEURURER, C.; SMUTNY, R. Impacts of climate change upon cooling and heating energy demand of office buildings in Vienna, Austria, **Energy and Buildings**, v. 80, n. 6, p. 517-530, 2014.

BLADH, M.; KRANTZ, H. Towards a bright future? Household use of electric light: a micro level study. **Energy Policy**, v. 36, n. 4, p. 3521-3530, 2008.

BLENGINI, G. A. Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n.12, p.1373-1381, 2008.

BLENGINI, G. A.; DI CARLO, T. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 869-880, 2010.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, n. 10, p. 82-91, 2014.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R.; KOUKKARI, H. Building Sustainability Assessment. **Sustainability**, v. 2, p. 2010-2023, 2010.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional**. 2016. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf. Acesso em: 06 abr. 2017

BRASIL; ELETROBRÁS; PROCEL. **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - ano base 2005**. 2007.

BRASIL. Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2014.

BRIBÍAN, I.; USÓN, A.; SCARPELLINI, S. Life cycle assessment in buildings: state of the art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n.12, p.2510-2520, 2009.

BROWN, R. YANUCK, R. Introduction to Life Cycle Costing, **The Fairmont Press**, INC. 1985.

BUCHANAN, A. H.; HONEY, B. G. Energy and carbon dioxide implications of building construction. **Energy and Buildings**, v. 20, n. 3, p. 205–217, 1994.

BUENO, C.; HAUSCHILD, M.; ROSSIGNOLO, J.; OMETTO, A.; MENDES, N. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2208-2220, 2016.

BUYLE, M.; AUDENAERT, A.; BRAET, J.; DEBACKER, W. Towards a more sustainable building stock: optimizing a flemish dwelling using a life cycle approach. **Buildings**, v. 5, p. 424–448, 2015.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, n. 10, p. 379-388, 2013.

BPIE - Buildings Performance Institute Europe. **Europe's buildings under the microscope**. A country-by-country review of the energy performance of buildings. 2011. Disponível em: http://www.bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/20/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf. Acesso em: 25 nov. 2014.

CABEZA, L.; BERRENECHE, C.; MIRO, L.; MARTINEZ, M.; FERNANDEZ, I.; VORSATZ, D. Affordable construction towards sustainable buildings: review on embodied energy in building materials. **Environmental Sustainability**, v. 5, n. 4, p. 229-236, 2014.

CABEZA, L.; RINCON, L.; VILARINO, V.; PEREZ, G.; CASTELL, A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 87, n. 8, p. 673-680, 2010.

CAIXA. **Cadernos CAIXA Projeto padrão – casas populares 42m²**. 2007. Disponível em: <http://www1.caixa.gov.br/download/>. Acesso em: 05 abr. 2013.

CALDAS, L.R.; SPOSTO, R.M.; PAULSEN, J.S.; SANTOS FILHO, V.M. Emissões de CO₂ no ciclo de vida de habitações de interesse social: estudo de caso para o DF-Brasil. **Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção**. São Carlos. Anais SIBRAGEC ELAGEC, 2015.

CAMERA DI COMMERCIO DI MILANO. **Opere di edilizia**. Disponível em: www.piuprezzi.it. Acesso em: 04 mar. 2017.

CARVALHO, J. **Análise de Ciclo de Vida ambiental aplicada a construção civil - Estudo de caso: Comparação entre Cimentos Portland com adição de resíduos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. São Paulo, 2002.

CASTELLANO, J.; RIBERA, A.; CIURANA, J. Integrated system approach to evaluate social, environmental and economics impacts of buildings for users of housings. **Energy and Buildings**, v. 123, p. 106-118, 2016.

CATALONIA INSTITUTE OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY. **BEDEC PR/PCT ITEC materials database**. Disponível em: <http://itec.cat/nouBedec.c/bedec.aspx>; Acesso em: 20 out. 2014. 2009.

CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Fator de emissão do combustível**. Disponível em:

http://www.cbcs.org.br/sbcs10/website/userFiles/palestras_sbcs_10/emis_sao_co2_transporte.pdf; Acesso em: 15 mai. 2015.

CELLURA, M.; GUARINO, F.; LONGO, S.; MISTRETTA, M. Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study. **Energy and Buildings**, v. 72, n. 2, p. 371-381, 2014.

CENNI di cambiamento. **Classificazione energetica CENED**. Disponível em: http://www.cennidicambiamento.it/images/stories/docs/35/CENNIDICA_MBIAMENTO_WEB.pdf . Acesso em: 12 out. 2016.

CHANG, Y.; RIES, R.; WANG, Y. The quantification of the embodied impacts of construction projects on energy, environment, and society based on I-O LCA. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 6321-6330, 2011.

CHANG, Y.; RIES, R.; WANG, Y. Life-cycle energy of residential buildings in China. **Energy Policy**, v. 62, n. 3, p. 656-664, 2013.

CHANDRATILAKE, S. R.; DIAS, W. P. S. Sustainability rating systems for buildings: Comparisons and correlations. **Energy**, v. 59, n. 0, p. 22-28, 2013.

CHASTAS, P.; THEODOSIOU, T.; BIKAS, D. Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. **Building and Environment**, v. 105, p. 267-282, 2016.

CHEHEBE, J.R.B. **Análise de Ciclo de Vida de Produtos – ferramenta gerencial da ISO 14000**. Qualitymark Ed. Rio de Janeiro, 1998.

CHEL, A.; TIWARI, G.N. Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house – Case study of vault roof mud-house in India. **Applied Energy**, v. 86, n. 1, p. 1956-1969, 2009.

CHEVALIER, J. L.; LE TÉNO, J. F. Requirements for an LCA-based Model for the Evaluation of the Environmental Quality of Building Products. **Building and Environment**, v. 31, n. 5, p. 487-491, 1996.

COLLINGE, W.; THIEL C.; CAMPION, N.; AL-GHAMDI, S.; WOLOSCHIN, C.; SORATANA, K. Integrating life cycle assessment with green building and product rating systems: north american. **Perspect Procedia**, v. 118, p. 662–669, 2015.

COLLINGE, W.; LANDIS, A.; JONES, A.; SCHAEFER, L.; BILEC, M. Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 538–552, 2013.

COSTA, B. L. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CRAWFORD, R.H. A post-occupancy life cycle energy assessment of a residential building in Australia. **Architectural Science Review**, v. 57, n. 2, p. 114-124, 2013.

CRAWFORD, R. H.; TREOLAR, G. J. Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia. **Solar Energy**, v. 76., n. 1-3., p. 159-163, 2004.

CUÉLLAR-FRANCA, R.M.; AZAPAGIC, A. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. **Building and Environment**, v. 54, n. 8, p.86-99, 2012.

DALE, S. J. Introduction to life cycle costing. **Life cycle costing for construction**, v. 22, p. 1 – 22, 2007.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. ASHRAE Transactions 104 (1a), p. 145–67, 1998.

DECRETO N. 6480. **Disposizioni in merito alla disciplina per l'efficienza energetica degli edifici e per il relativo attestato di prestazione energetica a seguito della dgr 3868 del 17.7.2015**. Direzione generale ambiente, energia e sviluppo sostenibile. 2015.

DELFANI, S.; KARAMI, M.; PASDARSHAHRI, H. The effects of climate change on energy consumption of cooling system in Theran. **Energy and Buildings**, v. 42, n.10, p. 1952-1957, 2010.

DE VECCHI, R., SORGATO, M., PACHECO, M., CANDICO, C., LAMBERTS, R.. ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: the Brazilian case. **Architectural Science Review**, v. 58, n.1, p. 93-101, 2014.

DIXIT, M. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.79, n 4, p.390-413, 2017.

DIXIT, M. Identification of parameters for embodied energy measurement: a literature review. **Energy and Buildings**, v.42, n 4, p.1238-1247, 2010.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; BONAKDAR, F. Effects of future climate change scenarios on overheating risk and primary energy use for Swedish residential buildings. **Energy Procedia**, v.61, p.1179–1182, 2016.

DLGS 311 – Decreto legislativo 29 dicembre 2006. **Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.** 2006.

DPR 412 - Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993. **Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.** 1993.

EN15804. Sustainability of construction works – **Environmental product declarations- Core rules for the product category of construction products.** European Committee for Standardization, 2012.

EN15978. Sustainability of construction works - **Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method**. European Committee for Standardization, 2011.

ENEA. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. **Rapporto Annuale Efficienza Energetica** (RAEE). 2017.

EPLCA- European Platform on Life Cycle Assessment. **ILCD Handbook: Framework and requirements fo Life Cycle Impact Assessment models and indicators**. 2010.

FAVA, J. A. Life Cycle Initiative: A Joint UNEP/SETAC Partnership to Advance the Life- Cycle Economy. **International Journal of LCA**. p. 196 – 198. Ecomed Publishers. 2002.

FAY, M. R. **Comparative life cycle energy studies of typical Australian suburban dwellings**. Building and Planning. Tese de Doutorado. Melbourne, AU, 1999.

FORSBERG, A.; MALMBORG, F. V. Tools for environmental assessment of the built environment. **Building and Environment**, v. 39, n. 2, p. 223-228, 2004.

FRANK, T. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland, **Energy and Buildings**, v.37, p. 1175–1185, 2005.

FRENETTE, C. D.; BULLE, C.; BEAUREGARD, R.; SALENIKOVICH, A.; DEROME, D. Using Life Cycle Assessment to derive an environmental index for light-frame wood wall assemblies. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2111-2122, 2010.

FULLER, S.; PETERSEN, S. **Life Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program**. NIST Handbook 135, 1995.

GHISI, E.; GOSH, S.; LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 2, p. 4107-4120, 2007.

GIORDANO, R.; SERRA, V.; TORTALLA, E.; VALENTINI, V.; AGHEMO, C. Embodied Energy and Operational Energy Assessment in the Framework of Nearly Zero Energy Building and Building Energy Rating. **Energy Procedia**, v.9, p.3204-3209, 2015.

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Building**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GRATIA, E.; DE HERDE, A. Design of low energy office buildings. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 5, p. 473-491, 2003.

GRIEGO, D.; KRARTI, M.; HERNANDEZ-GUERRERO, A. Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. **Energy and Building**, v. 54, n. 11, p. 540-549, 2012.

GUAN, L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings, **Building and Environment**, v. 44, p. 793–800, 2009.

GUAN, J.; ZHANG, Z.; CHU, C. Quantification of building embodied energy in China using an input–output-based hybrid LCA model. **Energy and Buildings**, v. 110, p. 443– 452, 2016.

GUINÉE, J.B. (Coord.). **Life Cycle Assessment – an operational guide to the ISO Standards**. Leiden University, Holanda. Maio 2001. Disponível em: <http://media.leidenuniv.nl/legacy/new-dutch-lca-guide-part-1.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2014.

HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon & Energy (ICE)**. Version 2.0. Disponível em: <www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied>. University of Bath, 2011.

HAN, G., SREBRIC, J; ENACHE-POMMER, E. Variability of optimal solutions for building components based on comprehensive life cycle cost analysis. **Energy and Buildings**, v. 79, n. 1, p. 223 – 231, 2014.

HERNANDEZ, P.; KENNY, P. Development of a methodology for life cycle building energy ratings. **Energy Policy**, v. 39, n. 4, p. 3779-3788, 2011.

HOFF, V.T.; BLOCHEN, B.; TIMMERMANS, H.; HENSEN, J. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. **Energy**, v. 94, p. 811–820, 2016.

HONG, J.; SHEN, G.Q.P.; FENG, Y. **Life Cycle Assessment of Green Buildings: A Case Study in China**. ICCREM. ASCE, 2013.

HORNE, R.; GRANT, T.; VERGHESE, K. **Life Cycle Assessment: principles, practice and prospects**. Collingwood: CSIRO Publishing, 2009.

HUANG, K.; HWANG, R. Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: the case of Taiwan, **Applied Energy**. v. 184, p. 1230 – 1240, 2016.

HUBERMAN, N., PERLMUTTER, D. A Life-cycle energy analysis of building materials in the Negev Desert. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 5, p. 837 – 848, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Síntese de Indicadores Sociais: **Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA)**, 2016. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, ISBN 978-85-240-4143-3, Rio de Janeiro, 2016.

IEA, International Energy Agency. World Energy Outlook 2016. IEA, Paris. Disponível em: <http://www.iea.org>. Acesso em: 12 fev. 2017.

INGRARO, C.; SCRUCICA, F.; TRICASE, C.; ASDRUBALI, F. A comparative Life Cycle Assessment of external wall-compositions for cleaner construction solutions in buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 283-298, 2016.

INTERNACHI. **InterNACHI's Standard Estimated Life Expectancy Chart for Homes**. Disponível em : <https://www.nachi.org/life-expectancy.htm>. Acesso em 24 out. 2016.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Life-cycle energy and cost analyses of window shading used to improve the thermal performance of houses. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p.1371-1383, 2016a.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, 2016b.

INVIDIATA, A.; ORDENES, M. Design changes for energy efficiency of solar decathlon house in brazil: a case study “Ekò House”. Conference of Building Simulation. **Anais...**p. 34-42. Chambéry, France, 2013.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report** **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<http://ar5-syr.ipcc.ch/>>. Geneva: 2014.

ISLAM, H.; JOLLANDS, M.; SETUNGE, S, BHUIYAN, M.A. Optimization approach of balancing life cycle cost and environmental impacts on residential building design. **Energy and Buildings**, v. 87. n. 2. p. 282-292, 2015a.

ISLAM, H.; JOLLANDS, M.; SETUNGE, S. Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**., v. 42. n. 1. p. 129-140, 2015b.

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

ISO Standard 21929-1. **Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings**. Geneva International Standards Institution, 2011.

ISO Standard 7730. **Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**, Geneva International Standards Institution, 2005.

ISTAT – Istituto nazionale di statistica. **15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011**. Disponível em: http://www.istat.it/it/files/2013/12/Nota-diffusione_delle_abitazioni20122013.pdf. Acesso em: 21 fev. 2017.

ISTAT – Istituto nazionale di statistica. **Prezzi al consumo per l'intera coletividade**. Disponível em: <https://www.istat.it/it/prezzi>. Acesso em: 28 mar. 2017.

ITÁLIA - BEN - Bilancio energetico Nazionale. **Poteri Caloríficos Inferiores (P.C.I.) adotados para a conversão em calorías das quantidades físicas das fontes energéticas**. 2007.

ITÁLIA - Decreti 26 giugno 2015. **Requisiti Minimi, le Linee Guida per la Certificazione Energetica e i nuovi schemi di Relazione Tecnica** (Gazzetta Ufficiale n. 162 del 15 luglio 2015). 2015.

JABER, S.; AJIB, S. Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 3, p. 1829-1834, 2011.

JENTSCH, M.; BAHAJ, A.; JAMES, P. Climate change future proofing of buildings Generation and assessment of building simulation weather files. **Energy and Buildings**, v. 40, p. 2148–2168, 2008.

JENTSCH, M.; JAMES, P.; BOURIKAS, L.; BAHAJ, A. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates, *Renew. Energy*, v. 55, p. 514–524, 2013.

JOHNSON, M.P. Decision support for family relocation decisions under the section 8 housing assistance program using GIS and the analytic hierarchy process. **Journal of Housing Research**, v. 12, p. 277–306, 2002.

KALBUSCH, A.; GHISI, E. Método para quantificação do consumo energético no ciclo de vida de equipamentos hidrossanitários. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 57-73, jul./set. 2012.

KARIMPOUR, M.; BELUSKO, M.; XING, K.; BRUNO, F. Minimizing the life cycle energy of buildings: Review and analysis. **Building and Environment**, v. 73, n. 6, p. 106-114, 2014.

KAKLAUSKAS, A.; ZAVADSKAS, E.; RASLANAS, S.; GINEVICIUS, R.; KOMKA, A.; MALINAUSKAS, P. Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: A Lithuanian case. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, p. 454-462, 2006.

KENDALL, A. **A Dynamic Life Cycle Assessment Tool for Comparing Bridge Deck Designs**. Center for Sustainable Systems, Report No. CSS04-12, University of Michigan. Ann Arbor, 2004.

KIBERT, CHARLES, J. Sustainable Construction: Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16, November 6-9, 1994, Tampa, Florida, USA. Univ. of Florida Center for, 1994.

KYLILI, A.; ILIC, M.; FOKAIDES, P.A. Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, n. 8, p. 169-177, 2017.

KIM, G.; LIM, H.; LIM, T.; SCHAEFER, L.; KIM, J. Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 46, n. 9, p. 105-111, 2012.

KNEIFEL, J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 334-340, 2010.

KOFOWOROLA, O.F., GHEEWALA, S.H. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 6, p. 498-511, 2008.

KUMAR, R.; GARDONI, P. Renewal theory-based life-cycle analysis of deteriorating engineering systems. **Structural Safety**, v. 50, n. 9, p. 94-102, 2014.

KYLILI, A.; ILIC, M.; FOKAIDES, P.A. Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116. n. 8. p. 169-177, 2017.

LAMBERTS, R.; CÂNDIDO, C.; DEAR, C.R.; DE VECCHI, R. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. 2013. Disponível em: http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Towards_a_Brazilian_Standard_Complete_Version2013.pdf. Acesso em: 09 abr. 2016.

LEE, K.; TAE, S.; SHIN, S. Development of a Life Cycle Assessment Program for building (SUSB-LCA) in South Korea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13. n. 8. p. 1994-2002, 2009.

LEWANDOWSKA, A.; NOSKOWIAK, A.; PAJCHROWSKI, G. Comparative life cycle assessment of passive and traditional residential buildings' use with a special focus on energy-related aspects. **Energy and Buildings**, v. 67, n. 5, p. 635-646, 2013.

LIMA, F.; PEDRINI, A. Influências de Decisões Arquitetônicas Sobre o Desempenho Energético de Hotéis no Clima Quente e Úmido da Cidade de Natal - RN. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Fortaleza. Anais XII ENTAC, 2008.

LIU, G.; LIU, B.; WANG, W.; ZHANG, J.; ATHALYE, R. **Advanced Energy Retrofit Guide. Practical ways to improve energy performance: Office Buildings**. PECEI - Washington. 2011.

LOBO, F. H. R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

LOBO, F. H. R.; TAVARES, S. F.; FREITAS, M. C. D. Avaliação de impacto ambiental com foco na Energia embutida: estudo de caso. In: ENCONTRONACIONAL, 5.; ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 3., 2009, Recife. **Anais...** Recife, PE, 2009.

LOTFI, S.; SOLAIMANI, K. An assessment of urban quality of life by using analytic hierarchy process approach (Case study: comparative study of quality of life in the north of iran). **Social Sciences**, v. 5, p. 123–133, 2009.

MA, Z.; COOPER, P.; DALY, D.; LEDO, L. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. **Energy and Buildings**, v. 55, n 6, p. 889-902, 2012.

MACEDO, D. B. G.. **Metodologia de avaliação do ciclo de vida de sistemas construtivos – aplicação em um sistema estruturado em aço**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Estrutural da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MARDOOKHY, M.; SAWHNEY, R.; SHUGUANG, J.; XIAOJUAN, Z.; WNJUN, Z. A study of energy efficiency in residential buildings in Knoxville, Tennessee. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 241-249, 2014.

MARSH, R.; LAURING, M. Architecture and energy: questioning regulative and architectural paradigms for Danish low-energy housing. **Architectural Research Quarterly**, v.15, n. 2, p. 165-175, 2011.

MARSZAL, A.J.; HEISELBERG, P. Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark. **Energy**, v. 36, n. 8, 5600-5609, 2011.

MARSZAL, A.J.; HEISELBERG, P; JENSEN, R.L.; NORGAARD, J. On-site or off-site renewable energy supply options? Life cycle cost analysis of a Net Zero Energy Building in Denmark. **Renewable Energy**, v. 44, n. 2, 154-165, 2012.

MASTRUCCI, A.; POPOVICI, E.; MARVUGLIA, A.; BENETTO, E.; LEOPOLD, U. GIS-based Life Cycle Assessment of urban building stocks retrofitting. **29th International Conference on Informatics for Environmental Protection**, p. 47–56, 2015.

MAZOUZ, S.; ZEROUALA, M. The integration of environmental variables in the process of architectural design - The contribution of expert systems. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 5, p. 699-710, 2001.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W. W. **The Limits to Growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind**, Universe Books, 1972.

MET OFFICE – **Meteorological Office, Weather and Climate Change**, 2016. Disponível em: <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2016/2015-global-temperature>. Acesso em: 20 jan. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço energético nacional: ano base 2009**. Brasília. 2010.

MIT- **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti**. Costo chilometrico medio relativo al consumo di gasolio delle imprese di autotrasporto per conto terzi. Disponível em: http://www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=10640. 2011. Acesso em: 12 mar. 2017.

MITHRARATNE N.; VALE, B. Life cycle analysis model for New Zealand houses. **Building and Environment**, v. 39, n. 5, p. 483 – 492, 2004.

MONTEIRO, H.; FERNANDEZ, J.; FREIRE. Comparative life-cycle energy analysis of a new and an existing house: The significance of occupant's habits, building systems and embodied energy. **Sustainable Cities and Society**, v. 26, p. 507 – 518, 2016.

MORAIS, A. E.; SPOSTO, R. M. Revestimento cerâmico e de granito: estudo preliminar comparativo com foco na energia incorporada. In: ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO; ENTAC 2010. Out. 6-8; Canela, BR. **Anais ...Canela**, 2010.

MOTUZIENE, V.; ROGOZA, A.; LAPINSKIENE, V.; VILUTIENE, T. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 532–541, 2016.

MULFARTH, R.C.K. **Arquitetura de baixo impacto humano e ambiental** – Vol I. 2002. 64p. Tese de Doutorado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MULLINER, E.; MALYS, N.; MALIENE, V. Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability. **Omega**, v. 59, p. 146-156, 2016.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. Special Report on Emissions Scenarios. **A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2000.

NG, W. Y.; CHAU C.K. New life of the building materials- recycle, reuse and recovery. **International Conference on Applied Energy**, v. 75, p. 2884 – 2891. Elsevier, 2015.

NIK, V.; MATA, E.; SASIC KALAGASIDIS, A.; SCARTEZZINI, J. Effective and robust energy retrofitting measures for future climatic conditions—Reduced heating demand of Swedish households. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 176 – 187, 2016.

NICOLETTI, G. M.; NOTARNICOLA, B.; TASSIELLI, G. Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, n. 3, p. 283 – 296, 2002.

NORRIS, G.; YOST, P. A Transparent, Interactive Software Environment for Communicating Life-Cycle Assessment Results: An Application to Residential Windows. **Journal of Industrial Ecology**, v. 5, n. 4, p. 48-68, 2002.

OLIVER-SOLÀ, J; JOSA, A; RIERADEVALL, J; GABARRELL, X. Environmental Optimization of Concrete Sidewalks in Urban Areas. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 4, p. 302-312, 2009.

OLGYAY, V. **Arquitectura y Clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gilli, 1998.

OLONSCHECK, M.; HOLSTEN, A.; KROPP, J.P. Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. **Energy Policy**, v. 39, p. 4795–4806, 2011.

ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Operational energy in the life cycle of residential dwellings: The experience of Spain and Colombia. **Applied Energy**, v. 87, n. 8, p. 673-680, 2010.

OSGOOD, C.E.; SUCI, G.J.; TANNENBAUM, P.H. **The Measurement of Meaning**. University of Illinois Press, Urbana, IL, USA, 1957.

PALMISANO, G. O.; LOISI, R.; RUGGIERO, G.; ROCCHI, L.; BOGGIA, A.; ROMA, R.; DAL SASSO, P. Using Analytic Network Process and Dominance-based Rough Set Approach for sustainable requalification of traditional farm buildings in Southern Italy. **Land Use Policy**, v. 59, n. 6, p. 95-110, 2016.

PAULSEN, J.; SPOSTO, R. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Buildings**, v. 57, n. 8, p. 95-102, 2013.

PEREIRA, S. W. **Análise ambiental dos processos produtivos de pisos cerâmicos. Aplicação de avaliação do ciclo de vida**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

POMBO, O.; ALLACKER, K.; RIVELA, B.; NEILA, J. Sustainability assessment of energy saving measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting - A case study of the Spanish housing stock. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 384-394, 2016.

PEREZ, N.; BAIRD, G.; BUCHANAN, A. The influence of construction materials on the life cycle energy use and carbon dioxide emission of medium sized commercial buildings. In: 2008 WORLD SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE. 2008. Sep 21-25; **Proceedings ...**. Melbourne, AU. Melbourne, 2008.

PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS. **Tabela de Preço dos Postos de Combustíveis em Florianópolis - Santa Catarina**. Disponível

em :<http://www.precodoscombustiveis.com.br/postos/cidade/4398/sc/florianopolis>. Acesso em 10 jan. 2015.

PREZZIBENZINA. Disponível em:
<https://www.prezzibenzina.it/regioni/lombardia/milano>. 2017. Acesso em: 28 abr. 2017.

RABBANI, A.; ZAMANI, M.; YAZDANI-CHAMZINI, A.; ZAVADSKAS, K. Proposing a new integrated model based on sustainability balanced scorecard (SBSC) and MCDM approaches by using linguistic variables for the performance evaluation of oil producing companies. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n.16, p. 7316-7327, 2014.

RAMESH, S. Appraisal of Vernacular Building Materials and Alternative Technologies for Roofing and Terracing Options of Embodied Energy in Buildings. **Energy Procedia**, v. 14, n 12, p. 1843-1848, 2012.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n 4, p. 1592-1600, 2010.

RAUF, A.; CRAWFORD, R. Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings. **Energy**, v. 79, p. 140-148, 2015.

RAUF, A.; CRAWFORD, R. The relationship between material service life and the life cycle energy of contemporary residential buildings in Australia. **Architectural Science Review**, v. 56, n 3, p. 252-261, 2013.

REDDY, V.B.; JAGADISH, K.S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings**, v. 35, n 11, p. 129-137. Elsevier, 2003.

RIBEIRO, F.M., SILVA, G.A., Enfoque sobre produto: uma necessária mudança de paradigma para busca do desenvolvimento sustentável. Global conference: building a sustainable world, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2002.

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

RISHOLT, B.; TIME, B.; HESTNES, A. G. Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 217–224, 2013.

RISTIMAKI, M.; SAYNAJOKI, A.; NEINONEN, J.; JUNNILA, S. Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. **Energy**, v. 63, n. 10, p. 168-179, 2013.

RODRIGUES, B.; ZOLDAN, M. A.; LEITE, M.L.; OLIVEIRA, I.L. Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV). XXVIII Encontro nacional de engenharia de produção. - A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. **Anais...**p. 34-42. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

RORIZ, M. Higiene do Trabalho: temperatura. São Carlos: UFSCAR; Departamento de Engenharia de Produção. Apostila. 2001.

RUPP, R.F.; GHISI, E. Potencial de economia de energia elétrica em edificações comerciais híbridas localizadas em Florianópolis, SC. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 143-60, jan./mar. 2013.

SAATY, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, p. 83-98, 2008.

SARTORI, I; HESTNES, A. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article **Energy and Buildings**, v. 39, n. 8, p. 249-257, 2007.

SCHEUER, C.; KEOLEIAN, A.G.; REPPE, P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modelling challenges and design implications. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 8, p. 1049-1064, 2003.

SHOJAEI, P.; KARIMLOU, M.; NOURI, J. MOHAMMADI, F.; AFZALI, H., FOROUZAN, A.S. Ranking the Effects of Urban Development Projects on Social Determinants of Health: Health Impact Assessment. **Global Journal of Health Science**, v. 6, n. 5, p. 183-195, 2014.

SIRENA. Sistema Informativo Regionale Energia e Ambiente. **Fattori di conversione e fattori di emissione utilizzati in Sirena 20 ottobre 2015**. Disponível em:
http://www.energielombardia.eu/c/document_library/get_file?uuid=675ad6f1-f9f5-46e1-8ec6-527aee01a309&groupId=8924855. Acesso em: 02 Jan. 2017.

SCHMIDT, A. C. et al. A Comparative. Life Cycle Assessment of Building Insulation Products made of Stone Wool, Paper Wool and Flax. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 1, p. 53-66, 2004.

SEELIG, M. F.; ZEPKA, G. S.; FOSTER, P. R. P. Aplicações de um Índice de Conforto Térmico Universal: temperatura fisiológica equivalente. In: **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu: 2002.

SILVA, L.P. **Análise do ciclo de vida energético de habitações de interesse social**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, V. G. **Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios de Escritórios Brasileiros: Diretrizes e Base Metodológica**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SINAPI. Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil. **Preços de Insumos**. Março 2016.

SOARES, S. R., SOUZA, D. M. de, PEREIRA, S. W. A avaliação do Ciclo de Vida no Contexto da Construção Civil. In: SATTLE, M. A.,

PEREIRA, F. A. R. **Construção e Meio Ambiente**. v.7. Habitar. Porto Alegre, 2006.

SOUZA, R.G.; ROSENHEAD, J.; SALHOFER, S.; VALLE, R.; LINS, M. Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 41- 51, 2015.

STAZI, F.; VEGLIÒ, A.; DI PERNA, C.; MUNAFÒ, P. Retrofitting using a dynamic envelope to ensure thermal comfort, energy savings and low environmental impact in Mediterranean climates. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 350–362, 2012.

STEPHAN, A.; CRAWFORD, R.; MYTTENAERE, K. A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. **Applied Energy**, v. 112, n. 12, p. 23-34, 2013.

STEPHAN, A.; CRAWFORD, R.; MYTTENAERE, K. Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, n. 12, p. 592-600, 2012.

STILLWELL, W.G.; SEAVER, D.A.; EDWARDS, W. (1981). A Comparison of Weight Approximation Techniques in Multiattribute Utility Decision Making. **Organization Behavior and Human Performance**, v. 28, n. 1, p. 62-77, 1981.

SURGELAS, V. **Inventário do ciclo de vida dos processos de produção do bloco cerâmico e bloco de resíduos de construção e demolição RCD**. Dissertação de mestrado do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2010.

TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. **Environmental comparative evaluation of the water heating typologies for residential use: part 1**. CIB W62 – Water supply and drainage for buildings symposium’ 2001. Portoroz, 2001.

TAKANO, A.; WINTER, S; HUGHES, M; LINKOSALMI, L. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. **Building and Environment**, v. 79, n. 5, p. 20 – 30, 2014.

TAKANO, A.; PAL, S.K.; KUITTINEN, M.; ALANNE, K.; HUGHES, M.; WINTER, S. The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland. **Building and Environment**, v. 89, p. 192–202, 2015.

TALEGHANI, M. et al. Energy use impact of and thermal comfort in different urban block types in the Netherlands. **Energy and Buildings**, v. 67, p. 166–175. Elsevier, 2013.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F.; LOPES, T.V.; SAVI, A.C.; OLIVEIRA, E. Telhado verde, energia embutida e emissão de CO₂: análise comparativa a coberturas convencionais. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Maceió. Anais XV ENTAC, 2014.

TAYLOR, P.G.; FRANCOEUR, M.; TRUDEAU, N. Final energy use in IEA countries: the role of energy efficiency. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 6463-6474, 2011.

TCPO. **Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos TCPO 14**. 14a. ed. São Paulo: Pini, 2012.

THORMARK, C. Allow energy building in a life cycle its embodied energy need for operation and recycling potential. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 1, p. 429-435, 2002.

THORMARK, C. The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 1019-1026, 2006.

TRAVERSO, M.; RIZZO, G.; FINKBEINER, M. Environmental Performance of Building Materials: Life Cycle Assessment of a Typical Sicilian Marble. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 1, p. 104-114, 2010.

TRIANA, M.A.M. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

TRIANAPHYLLOU, E. **Multi-criteria decision making methods: a comparative study**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2000.

TRIFUNOVIC, J.; MIKULOVIC, J.; DJURISIC, M.; KOSTIC, M. Reductions in electricity consumption and power demand in case of the mass use of compact fluorescent lamps. **Energy**, v. 34, n. 6, p. 1355-1363, 2009.

UNEP- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Policy coherence of the sustainable development goals. A natural resource perspective**. Disponível em: <http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/50244/publications/Policy_Coherenceofthe_Sustainable_DevelopmentGoals.pdf>. 2015.

UNI 10339. **Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura**. 2014.

UNI TS 11300. **Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale**. 2014.

VILUTIENE, T.; ZAVADSKAS, E.K. The application of multi-criteria analysis to decision support for the facility management of a city's residential district. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 10, n. 6, p. 241-252, 2003.

WANG, X.; CHEN, D.; REN, Z. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. **Building and Environment**, v. 45, p. 1663–1682, 2010.

WEN, T.J.; SIONG, H.C.; NOOR, Z.Z. Assessment of embodied energy and global warming potential of building construction using life cycle

analysis approach: case studies of residential buildings in Iskandar Malaysia. **Energy and Buildings**, v. 93, p. 295-302, 2015.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press. 1987.

YOKOO, N.; NAOMI, T.; OKA, T. Embodied energy and CO2 emission associated with building construction by using I/O based data and process based data in Japan. **Proceedings of the sustainable buildings e construction products & technologies**, p. 1313-1318, 2013.

YU, W.; LI, B.; YAO, R.; WANG, D.; LI, K. A study of thermal comfort in residential buildings on the Tibetan Plateau, China. **Building and Environment**, v. 119, p. 71-86, 2017.

YUN, G.; CHOI, J.; KIM, J. Energy performance of direct expansion air handling unit in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 77, n. 3, p. 425-431, 2014.

YUNG, P.; LAM, K.; YU, C. An audit of life cycle energy analyses of buildings. **Habitat International**, v. 39, n. 3, p. 43-54, 2013.

APÊNDICE A – Questionário

1- Nell'ambito dell'edilizia, in quale settore professionale opera?
(No setor da construção civil, em qual área profissional você atua?)

Progettista **Tecnico amministrativo** **Ricercatore/docente**
(Projetista) (Setor Público) (Pesquisador/professor)

2- Nelle sue scelte professionali quali fattori d'impatto ambientale, tra quelli elencati in seguito, influenzano maggiormente le sue decisioni?
(anche più di una preferenza)
(Nas suas escolhas profissionais quais parâmetros, entre os apresentados a seguir, tem maior influência em suas decisões?)

Cambiamento climatico/effetto serra
(Mudança climática)

Distruzione dello strato di ozono
(Depleção da camada de ozônio)

Acidificazione
(Acidificação)

Eutrofizzazione
(Eutrofização)

Uso del suolo
(Uso da terra)

Formazione di ossidanti fotochimici (smog)
(Oxidação fotoquímica)

Tossicità umana
(Toxicidade humana)

Esaurimento di risorse materiche non rinnovabili
(Consumo de recursos não renováveis)

Esaurimento di risorse materiche rinnovabili
(Consumo de recursos renováveis)

Consumo di energia rinnovabile

(Consumo de energia renováveis)

Consumo di energia non rinnovabile

(Consumo de energia não renováveis)

Consumo d'acqua dolce

(Consumo de água doce)

Smaltimento di rifiuti

(Descarte de resíduos)

Smaltimento di rifiuti pericolosi

(Descarte de resíduos perigosos)

3- A cosa è dovuta la scelta dei precedenti fattori d'impatto ambientale?

(anche più di una preferenza)

(Do que depende a escolha dos precedentes parâmetros de impacto ambiental?)

Norme/leggi

(Normas/lei)

Formazione professionale

(Formação profissional)

Altro

(Outros)

4- Se si basa su norme/leggi/altro potrebbe specificare quali?

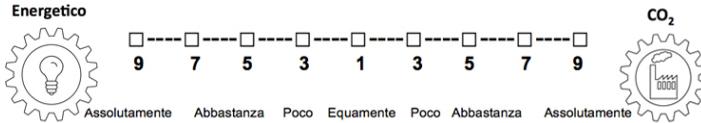
(Se a escolha depende de normas/leis/outra poderia especificar quais?)

.....

5- Tra il **CONSUMO ENERGETICO** e le **EMISSIONI DI CO₂**, in una scala da 1 a 9, dove 9 rappresenta il punteggio con la maggiore importanza per uno dei due fattori in confronto all'altro e 1 quando i due fattori hanno la stessa importanza, selezioni il punteggio che rappresenta le sue scelte professionali?

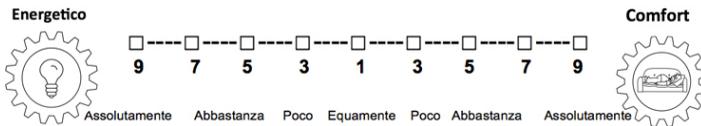
(Entre o consumo energético e as emissões de CO₂, em uma escala de 1 a 9, onde 9 representa a pontuação com a maior influência entre um dos dois parâmetros comparados entre si e 1 quando os dois parâmetros

tiverem a mesma importância, selecione a pontuação que melhor representa as suas escolhas profissionais?)



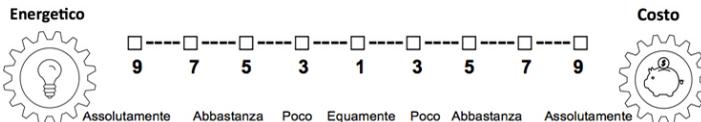
6 - Tra il **CONSUMO ENERGETICO** e il **COMFORT TERMICO**, in una scala da 1 a 9, dove 9 rappresenta il punteggio con la maggiore importanza per uno dei due fattori in confronto all'altro e 1 quando i due fattori hanno la stessa importanza, selezioni il punteggio che rappresenta le sue scelte professionali?

(Entre o consumo energético e o conforto térmico, em uma escala de 1 a 9, onde 9 representa a pontuação com a maior influência entre um dos dois parâmetros comparados entre si e 1 quando os dois parâmetros tiverem a mesma importância, selecione a pontuação que melhor representa as suas escolhas profissionais?)



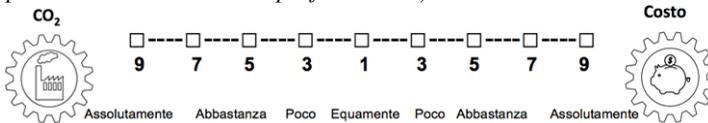
7 - Tra il **CONSUMO ENERGETICO** e i **COSTI ECONOMICI**, in una scala da 1 a 9, dove 9 rappresenta il punteggio con la maggiore importanza per uno dei due fattori in confronto all'altro e 1 quando i due fattori hanno la stessa importanza, selezioni il punteggio che rappresenta le sue scelte professionali?

(Entre o consumo energético e os custos financeiros, em uma escala de 1 a 9, onde 9 representa a pontuação com a maior influência entre um dos dois parâmetros comparados entre si e 1 quando os dois parâmetros tiverem a mesma importância, selecione a pontuação que melhor representa as suas escolhas profissionais?)



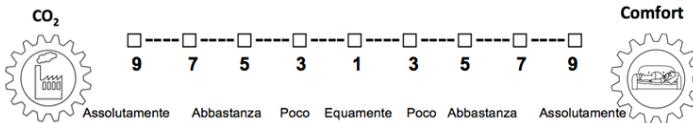
8 - Tra le **EMISSIONI DI CO₂** e i **COSTI ECONOMICI**, in una scala da 1 a 9, dove 9 rappresenta il punteggio con la maggiore importanza per uno dei due fattori in confronto all'altro e 1 quando i due fattori hanno la stessa importanza, selezioni il punteggio che rappresenta le sue scelte professionali?

(Entre as emissões de CO₂ e os custos financeiros, em uma escala de 1 a 9, onde 9 representa a pontuação com a maior influência entre um dos dois parâmetros comparados entre si e 1 quando os dois parâmetros tiverem a mesma importância, selecione a pontuação que melhor representa as suas escolhas profissionais?)



9 - Tra le **EMISSIONI DI CO₂** e il **COMFORT TERMICO**, in una scala da 1 a 9, dove 9 rappresenta il punteggio con la maggiore importanza per uno dei due fattori in confronto all'altro e 1 quando i due fattori hanno la stessa importanza, selezioni il punteggio che rappresenta le sue scelte professionali?

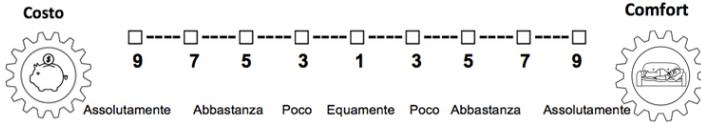
(Entre as emissões de CO₂ e o conforto térmico, em uma escala de 1 a 9, onde 9 representa a pontuação com a maior influência entre um dos dois parâmetros comparados entre si e 1 quando os dois parâmetros tiverem a mesma importância, selecione a pontuação que melhor representa as suas escolhas profissionais?)



10 - Tra i **COSTI ECONOMICI** e il **COMFORT TERMICO**, in una scala da 1 a 9, dove 9 rappresenta il punteggio con la maggiore importanza per uno dei due fattori in confronto all'altro e 1 quando i due fattori hanno la stessa importanza, selezioni il punteggio che rappresenta le sue scelte professionali?

(Entre os custos financeiros e o conforto térmico, em uma escala de 1 a 9, onde 9 representa a pontuação com a maior influência entre um dos dois parâmetros comparados entre si e 1 quando os dois parâmetros

tiverem a mesma importância, selecione a pontuação que melhor representa as suas escolhas profissionais?)



11- Eventuali commenti o suggerimenti:

(Sugestões e comentários:)

.....

.....

APÊNDICE B – Comparação da energia embutida ICE e na literatura brasileira.

A seguir é apresentada a Tabela 28 com a comparação dos dados da energia embutida da base de dados ICE (2011) e os dados brasileiros.

Tabela 28 – Base de dados da energia embutida ICE e na literatura brasileira.

Material	Energia Embutida (MJ/kg)			Fonte
	ICE		Brasil	
	Valor max.	Valor min.		
Alumínio anodizado	261,8	52,4	210,0	Tavares (2006)
Poliestireno expandido	122,9	78,0	112,0	Tavares (2006)
Cobre	106,5	31,5	75,0	Tavares (2006)
Tinta acrílica	132,5	26,9	61,0	Tavares (2006)
Aço	47,7	14,8	20,3	BRASIL (2012)
Vidro	29,2	10,9	18,5	Tavares (2006)
Papel e celulose	41,3	13,4	17,7	BRASIL (2012)
Lã de rocha	23,5	10,0	10,6	Shmid e Habib (2015)
Madeira MDF	12,1	10,0	9,0	Tavares (2006)
Madeira laminada	13,8	10,32	7,5	Tavares (2006)
Telha Cerâmica	18,2	2,1	5,4	Tavares (2006)
Telha de fibrocimento	12,1	8,2	5,1	Tavares (2006)
Placa de gesso	6,6	1,5	4,5	Tavares (2006)
Cimento comum	7,4	3,3	3,3	BRASIL (2012)
Blocos de cerâmica	8,4	0,2	2,9	Tavares (2006)
Argamassa	2,5	0,6	2,1	Tavares (2006)
Concreto	11,5	0,1	1,2	Tavares (2006)
Blocos de Concreto	11,5	0,1	1,0	Tavares (2006)
Brita	0,2	0,05	0,2	Tavares (2006)
Areia	0,4	0,05	0,1	Lobo (2010)

APÊNDICE C – Dados das estratégias de projeto nos estudos de casos brasileiro e italiano.

A seguir são apresentados em detalhe as características e os dados das estratégias de projeto utilizados nos dois estudos de caso (Tabelas 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 36).

Tabela 29 – Dados da ACVE das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro.

Estratégia	Materiais	Densidade (kg/m ³)	Quantidade	Unidade	Energia Inicial			Energia Manutenção					Energia de Demolição			Energia de Reseno				
					Energia Embutida (MJ/kg)	Fonte	Transporte estratégia (km)	Mão de obra (dias)	Substituições cenário			Atividade	Dias	Transporte (km)	Energia de Reseno (MJ/kg)	Fonte				
									1	2	3									
Pintura Baixa absorvância	Tinta Acrílica	0,013	8,1	l	79,70	ICE (2011)	50	3 dias - 2 pessoas	0	5	5	Limpeza Trienal	4 dias - 2 pessoas	3	Prinura 4 dias - 2 pessoas	5 dias - 1 pessoa	-	-	Não é avaliada	
	Pastilha cerâmica	1400	780,2	kg	10,15	ICE (2011)	50	6 dias - 2 pessoas	0	2	2	Limpeza Trienal	Remoção e substituição 7 dias - 2 pessoas	-	Remoção e substituição 7 dias - 2 pessoas	5 dias - 1 pessoa	0,8	Ng e Chau (2015)		
	Isolamento lá de rocha	50	593,0	kg	16,80	ICE (2011)	50	6 dias - 2 pessoas	0	1	0	-	Remoção e substituição 6 dias - 2 pessoas	-	Remoção e separação	5 dias - 1 pessoa	16,2	Ng e Chau (2015)		
Isolamento em EPS	Perfl alumínio	2700	70,9	kg	157,10	ICE (2011)	1000	6 dias - 2 pessoas	0	1	0	-	Remoção e substituição 6 dias - 2 pessoas	-	Remoção e separação	5 dias - 1 pessoa	108,9	Ng e Chau (2015)		
	EPS	30	207,6	kg	100,09	ICE (2011)	50	6 dias - 2 pessoas	0	1	0	-	Remoção e substituição 6 dias - 2 pessoas	-	Remoção e separação	5 dias - 1 pessoa	86,0	Ng e Chau (2015)		
	Perfl alumínio	2700	70,9	kg	157,10	ICE (2011)	1000	6 dias - 2 pessoas	0	1	0	-	Remoção e substituição 6 dias - 2 pessoas	-	Remoção e separação	5 dias - 1 pessoa	108,9	Ng e Chau (2015)		
Janela vidro simples	Vidro	2500	27,2	kg	20,08	ICE (2011)	50	1 dia - 2 pessoas	0	2	1	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	11,9	Ng e Chau (2015)	
	Alumínio	2700	32,2	kg	157,10	ICE (2011)	1000	2 pessoas	0	2	1	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	108,9	Ng e Chau (2015)	
	Alumínio	2700	108,9	kg	20,08	ICE (2011)	50	1 dia - 2 pessoas	0	2	1	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	11,9	Ng e Chau (2015)	
Forro em PVC	Alumínio	2700	72,0	kg	157,10	ICE (2011)	1000	3 dias - 2 pessoas	0	5	2	-	Remoção e substituição 4 dias - 2 pessoas	-	Remoção do revestimento	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	37,5	Impel Project - University of Cambridge
	PVC	1200	77,2	kg	70,60	ICE (2011)	50	3 dias - 2 pessoas	0	0	0	-	-	-	Remoção	1 dia - 1 pessoa	50	0,2	Ng e Chau (2015)	
	Cerâmica	1400	1535,6	kg	10,13	ICE (2011)	50	10 dias - 4 pessoas	0	0	0	-	-	-	Remoção	1 dia - 1 pessoa	50	0,2	Ng e Chau (2015)	
Laje mista	Concreto	2400	788,1	kg	21,25	ICE (2011)	50	10 dias - 4 pessoas	0	0	0	-	-	-	Remoção	1 dia - 1 pessoa	50	0,2	Ng e Chau (2015)	
	Aço	7800	1710,0	kg	1,18	ICE (2011)	1000	2 pessoas	0	0	0	-	-	-	Remoção	1 dia - 1 pessoa	50	0,2	Ng e Chau (2015)	
	Tinta Acrílica	0,013	2,5	l	79,70	ICE (2011)	50	3 dias - 2 pessoas	0	0	0	-	-	-	Remoção	1 dia - 1 pessoa	50	0,2	Ng e Chau (2015)	
Cobogo de concreto	Concreto	2400	329,4	kg	2,92	ICE (2011)	50	1 dia - 2 pessoas	0	1	1	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	50	0,8	Ng e Chau (2015)
	Argamassa	1900	39	kg	1,18	ICE (2011)	1000	2 pessoas	0	1	1	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	50	0,8	Ng e Chau (2015)
	Alumínio	2700	34,5	kg	157,1	ICE (2011)	50	2 pessoas	0	2	1	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	108,9	Ng e Chau (2015)	
Persiana de PVC	PVC	7800	2,1	kg	31,3	ICE (2011)	1000	2 pessoas	0	2	1	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	11,0	Ng e Chau (2015)	
	Alumínio	1200	15,1	kg	70,6	ICE (2011)	50	2 pessoas	0	2	2	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	37,5	Ng e Chau (2015)	
	Aço	7800	15,0	kg	31,3	ICE (2011)	1000	2 pessoas	0	2	2	Limpeza Anual	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	11,0	Ng e Chau (2015)	
Veneziana de Madeira	Alumínio	2700	60,0	kg	9,4	ICE (2011)	50	1 dia - 2 pessoas	0	2	1	Limpeza anual e pintura cada dois anos	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	16,0	Ng e Chau (2015)	
	Aço	7800	3,6	kg	31,3	ICE (2011)	1000	2 pessoas	0	2	1	Limpeza anual e pintura cada dois anos	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	11,0	Ng e Chau (2015)	
	Tinta	0,013	0,8	l	79,7	ICE (2011)	1000	2 pessoas	0	2	1	Limpeza anual e pintura cada dois anos	substituição 1 dia - 2 pessoas	Remoção e substituição 1 dia - 2 pessoas	1 dia - 1 pessoa	Remoção	1 dia - 1 pessoa	-	-	

Tabela 31 – Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro em Florianópolis.

Estratégia	Materiais	Custo Inicial						Custo de Manutenção						Custo de Demolição	
		Código SINAPI	Preço Material (R\$/kg) (R\$/m ²)	Transporte obra estratégia (km)	Preço Mão de obra (R\$/hs)	Substituições cenário			Custos cenário			Preço Mão de obra (R\$/hs) (R\$/m ²)	Transporte (km)		
						1	2	3	Preço manutenção 1 (R\$)	Preço manutenção 2 (R\$)	Preço manutenção 3 (R\$)				
Pintura Baixa absorvância	Tinta Acrílica	35692	39,1	50	Pintor 14,13	0	5	5	161	47626	47626	47626	Não é avaliada porque na demolição é retirada juntamente	-	
	Cerâmica	1287	13,8	50	Azulejista 17,07	0	2	2	161	51161	51161	51161			11,9
Pastilha cerâmica	Argamassa	1381	0,4	1000	Ajudante 10,29	0	1	0	0	47355	0	72222	6,4	50	
	Lã de rocha	*	25,3	50	Instalador 14,13	0	1	0	0	47355	0	72222	6,4	50	
Isolamento lã de rocha	Gesso	39416	23,1	250	Ajudante 10,29	0	1	0	0	47355	0	72222	6,4	50	
	Perfil alumínio	34360	27,9	1000	Ajudante 10,29	0	1	0	0	47355	0	72222	6,4	50	
Isolamento EPS em EPS	EPS	3409	13,8	50	Instalador 14,13	0	1	0	0	42092	0	72222	6,4	50	
	Gesso	39416	23,1	250	Ajudante 10,29	0	1	0	0	42092	0	72222	6,4	50	
Perfil alumínio	Perfil alumínio	34360	27,9	1000	Ajudante 10,29	0	1	0	0	42092	0	72222	6,4	50	
	Vidro	34363	530,5 un	50	Instalador 14,13	0	2	1	96	25661	12152	85334	12,3	50	
Janela vidro simples	Alumínio			1000	Ajudante 10,29	0	2	1	96	25661	12152	85334	12,3	50	
	Vidro			50	Instalador 14,13	0	2	1	96	47422	25489	85334	12,3	50	
Janela vidro duplo	Alumínio	*	1024,0 un	250	Ajudante 10,29	0	2	1	96	47422	25489	85334	12,3	50	
	Vidro			1000	Instalador 17,99	0	5	2	-	130134	71857	72238	5,7	50	
Forro em PVC	PVC	11587	35,0	50	Instalador 17,99	0	5	2	-	130134	71857	72238	5,7	50	
	Cerâmica			50	Ajudante 11,05	0	0	0	-	-	-	-	85370	188,8	50
Laje mista	Concreto	74141/003	82,76	50	-	0	0	0	-	-	-	-	85370	188,8	50
	Aço		250	250	mao,deobra incluída	0	0	0	-	-	-	-	85370	188,8	50
Argamassa	Argamassa			1000	1000	0	0	0	-	-	-	-	85370	188,8	50
	Tinta Acrílica			50	50	0	0	0	-	-	-	-	85370	188,8	50
Cobogo de concreto	Concreto	663	10,05 un	50	Instalador 14,13	0	1	1	96	9831	9831	72219	79,9	50	
	Aço	1381	0,4	50	Ajudante 10,16	0	2	1	96	23184	9795	85334	12,3	50	
Veneziana de alumínio	Alumínio	34370	449,3 un	250	Instalador 14,13	0	2	1	96	23184	9795	85334	12,3	50	
	Aço			1000	Ajudante 10,16	0	2	1	96	23184	9795	85334	12,3	50	
Persiana de PVC	PVC	*	1000,0 un	50	Instalador 14,13	0	2	2	96	57902	57902	85334	12,3	50	
	Aço			1000	Ajudante 10,16	0	2	1	9801	47711	24104	85334	12,3	50	
Veneziana de Madeira	Alumínio	84845	638,0 un	250	Instalador 14,13	0	2	1	9801	47711	24104	85334	12,3	50	
	Madeira			1000	Ajudante 10,16	0	2	1	9801	47711	24104	85334	12,3	50	

Tabela 32 – Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro em Curitiba.

Estratégia	Materiais	Custo Inicial						Custo de Manutenção					Custo de Demolição		
		Código SIN/API	Preço Material (R\$/kg) (R\$/m²) (R\$/m³)	Transporte obra (km)	Preço Mão de obra (R\$/hs)	Substituições cenário			Custos cenário			Código SIN/API	Preço Mão de obra (R\$/hs) (R\$/m²) (R\$/m³)	Transporte (km)	
						1	2	3	Preço manutenção 1 (R\$)	Preço manutenção 2 (R\$)	Preço manutenção 3 (R\$)				
Pintura Baixa absorvência	Tinta Acrílica	35692	45,1	50	Pintor 15,77	0	5	5	148	53726	53726	53726	85367	15,5	50
	absorvência			250	Ajudante 11,87										
Pastilha cerâmica	Cerâmica	1287	15,9	1000		0	2	2	148	59760	59761	59761	85367	15,5	50
	Argamassa	1381	0,4	1000	Azulejista 19,06	0	2	2	148	59760	59761	59761	85367	15,5	50
Isolamento térmico de rocha	Lã de rocha	*	28,0	50	Ajudante 11,20	0	2	2	148	59760	59761	59761	85367	15,5	50
	Gesso	39416	21,7	250	Instalador 15,79	0	1	0	0	46949	0	0	72222	8,2	50
Perfil alumínio	Perfil alumínio	34360	20,1	1000	Ajudante 12,19	0	1	0	0	46949	0	0	72222	8,2	50
				50	Instalador 15,79	0	1	0	0	46949	0	0	72222	8,2	50
Isolamento em EPS	EPS	3409	13,4	50	Ajudante 12,19	0	1	0	0	49029	0	0	72222	8,2	50
	Gesso	39416	21,7	250	Instalador 15,79	0	1	0	0	49029	0	0	72222	8,2	50
Janela vidro simples	Perfil alumínio	34360	20,1	1000	Ajudante 12,19	0	1	0	0	49029	0	0	72222	8,2	50
	Alumínio	34363	748,5 un	50	Instalador 15,79	0	2	1	93	35662	16869	16869	85334	16,2	50
Janela vidro duplo	Alumínio			50	Ajudante 11,20	0	1	1	93	57770	31058	31058	85334	16,2	50
		*	1250,0 un	250	Instalador 15,79	0	2	1	93	57770	31058	31058	85334	16,2	50
Furo em PVC	Alumínio			50	Ajudante 11,20	0	1	1	93	57770	31058	31058	85334	16,2	50
		11387	59,9	250	Instalador 17,99	0	5	2	-	182712	100889	100889	72238	5,7	50
Cerâmica	Concreto			50	Ajudante 11,05	0	5	2	-	182712	100889	100889	72238	5,7	50
	Alumínio			50	Ajudante 11,05	0	5	2	-	182712	100889	100889	72238	5,7	50
Laje mista	Argamassa	74141003	90,2	250	Instalador 17,99	0	5	2	-	182712	100889	100889	72238	5,7	50
	Argamassa			1000	Ajudante 11,20	0	1	1	93	9369	9369	9369	72219	105,1	50
Cobogó de concreto	Tinta Acrílica	663	8,4 un	50	Ajudante 11,20	0	1	1	93	9369	9369	9369	72219	105,1	50
	Concreto	1381	0,4	1000	Instalador 15,79	0	1	1	93	9369	9369	9369	72219	105,1	50
Veneziana de alumínio	Alumínio	34370	748,5 un	50	Ajudante 11,20	0	2	1	93	38218	16125	16125	85334	16,2	50
	Aço			50	Ajudante 11,20	0	2	1	93	38218	16125	16125	85334	16,2	50
Persiana de PVC	PVC	*	1100 un	50	Instalador 15,79	0	2	2	93	58410	58410	58410	85334	16,2	50
	Aço			250	Ajudante 11,20	0	2	1	93	58410	58410	58410	85334	16,2	50
Veneziana de Madeira	Alumínio	84845	592,9 un	250	Instalador 15,79	0	2	1	11763	62039	30732	30732	85334	16,2	50
	Madeira			1000	Ajudante 11,20	0	2	1	11763	62039	30732	30732	85334	16,2	50

Tabela 33 – Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso brasileiro em Belém.

Estratégia	Materiais	Custo Inicial					Custo de Manutenção					Custo de Demolição	
		Código SINAPI	Preço Material (R\$/kg) (R\$/m ²) (R\$/m ³)	Transporte estratégia (km)	Preço Mão de obra (R\$/hs)	Substituições cenário	Preço manutenção 1 (R\$)	Preço manutenção 2 (R\$)	Preço manutenção 3 (R\$)	Código SINAPI	Preço Mão de obra (R\$/hs)	Transporte (km)	
													1
Pintura Baixa absorvência	Tinta Acrílica	35692	49,9	50	Pintor 12,81	0	5	5	49406	49406	Não é avaliada porque na demolição é reterida juntamente	-	
	Resina	1287	26,9	50	Ajudante 9,65	0	2	2	67517	67517	85367	12,5	
Isolamento térmico de rocha	Argamassa	1381	0,8	1000	Ajudante 9,25	0	2	2	195	195	72222	6,6	
	Gesso	39416	26,4	50	Instalador 12,81	0	1	0	0	64056	0	72222	6,6
Isolamento acústico em EPS	Perfil alumínio	34360	24,1	1000	Ajudante 10,07	0	1	0	0	49980	0	72222	6,6
	Gesso	39416	26,4	50	Instalador 12,81	0	1	0	0	49980	0	72222	6,6
Janela vidro simples	Perfil alumínio	34360	24,1	1000	Ajudante 10,07	0	1	0	0	49980	0	72222	6,6
	Vidro	34563	508,8 un	50	Instalador 12,81	0	2	1	116	24637	11680	85334	13,1
Janela vidro duplo	Alumínio	34563	508,8 un	50	Ajudante 9,25	0	2	1	116	24637	11680	85334	13,1
	Vidro	34563	508,8 un	50	Instalador 12,81	0	2	1	116	24637	11680	85334	13,1
Forro em PVC	Alumínio	*	1400,0 un	250	Ajudante 9,25	0	2	1	116	63904	34371	85334	13,1
	PVC	11587	33,3	50	Instalador 16,79	0	5	2	-	178241	98420	72238	5,9
Laje mista	Cerâmica	74141/003	87,1	50	Ajudante 9,25	0	0	0	-	-	-	85370	200,8
	Concreto	663	8,5 un	250	Instalador 12,81	0	1	1	116	8938	8938	72219	85,0
Veneziana de alumínio	Argamassa	1381	0,8	1000	Ajudante 9,25	0	1	1	116	8938	8938	72219	85,0
	Alumínio	34370	508,8 un	250	Instalador 12,81	0	2	1	116	26198	11073	85334	13,1
Persiana de PVC	Alumínio	*	1048 un	50	Ajudante 9,25	0	2	2	116	57818	57818	85334	13,1
	PVC	11587	33,3	50	Instalador 12,81	0	2	1	10449	60763	29432	85334	13,1
Veneziana de Madeira	Alumínio	34370	508,8 un	250	Instalador 12,81	0	2	1	116	26198	11073	85334	13,1
	Alumínio	34370	508,8 un	250	Ajudante 9,25	0	2	1	116	26198	11073	85334	13,1
Veneziana de Madeira	Alumínio	34370	508,8 un	250	Instalador 12,81	0	2	1	116	26198	11073	85334	13,1
	Alumínio	34370	508,8 un	250	Ajudante 9,25	0	2	1	10449	60763	29432	85334	13,1

Tabela 34 – Dados da ACVE das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso Italiano.

Estratégia	Elementos construtivos	Materiais	Densidade (kg/m ³)	Quantidade	Unidade	Energia Inicial			Energia Manutenção			Energia de Demolição			Energia de Rensou			
						Energia Embaída média (MJ/kg)	Fonte	Transporte estratégia (km)	Mão de obra (dias)	Substituições	Mão de obra (dias)	Atividade	Dias	Transporte (km)	Energia de Rensou (MJ/kg)	Fonte		
Caso 1	Paredes Externas	X-1 lam estrutura vertical	490	102878,0	kg	25,80				não						8,1	0,1	
		Gesso	900	28964,0	kg	4,50											0,8	0,8
		Lã de rocha 11 cm	67	9473,0	kg	20,20											-0,1	ICE
		Fibrocimento	1530	24619,0	kg	9,20		ICE									-0,1	(2011)
		Argamassa	1300	25102,0	kg	1,10											8,1	Eco-Inv
		X-1 lam estrutura horizontal	490	52382,0	kg	25,80		50	165 dias - 9 pessoas medianamente por dia		não	120 dias - 9 pessoas	Remoção e separação dos materiais	50 - 9 pessoas	50		194,3	(2016)
		Gesso	900	28964,0	kg	4,50		250									0,1	Eco-Inv
		Perfis em alumínio	2700	604,0	kg	143,10		1000									0,8	EPD
		Paredes Internas	900	47710,0	kg	4,50											0,8	0,8
		Lã de rocha 5 cm	67	3472,0	kg	20,20											8,1	0,8
Caso 2	Paredes Externas	X-1 lam 16 cm	490	81382,0	kg	25,80										0,8	0,8	
		Lã de rocha 12 cm	67	34866,0	kg	20,20											8,1	0,8
		X-1 lam estrutura vertical	490	102878,0	kg	25,80											0,1	0,1
		Gesso	900	28964,0	kg	4,50											23,2	23,2
		Fibra de madeira 12 cm	1530	24619,0	kg	9,20											-0,1	ICE
		Fibrocimento	137	21132,0	kg	26,80											8,1	(2011)
		Argamassa	490	30335,0	kg	25,80		50	160 dias - 9 pessoas medianamente por dia		não	120 dias - 9 pessoas	Remoção e separação dos materiais	50 - 9 pessoas	50		194,3	(2016)
		Gesso	900	52452,0	kg	4,50		250									0,1	Eco-Inv
		Perfis em alumínio	2700	604,0	kg	143,10		1000									0,1	EPD
		Paredes divisórias	900	47710,0	kg	4,50											23,2	23,2
Caso 3	Paredes Externas	Fibra de madeira 5 cm	137	7100,0	kg	26,80										8,1	8,1	
		X-1 lam 16 cm	490	81382,0	kg	25,80											-0,1	0,1
		Fibra de madeira 14 cm	137	4118,0	kg	26,80											-0,1	0,1
		Plates em concreto armado	2400	86267,0	kg	1,92											0,1	0,1
		Gesso	900	28964,0	kg	4,50											-0,1	0,1
		Blocos em concreto celular	900	28964,0	kg	8,0											-0,1	0,1
		Fibrocimento	1530	24619,0	kg	9,20											-0,1	0,1
		Argamassa	1300	25102,0	kg	1,10											-0,1	0,1
		Vigas em concreto armado	2400	475470,0	kg	1,92											-0,1	0,1
		Blocos cerâmicos	700	304758,0	kg	3,40		50	157 dias - 9 pessoas medianamente por dia		não	84 dias - 9 pessoas	Remoção e separação dos materiais	52 - 9 pessoas	50		-0,1	ICE
Capas de concreto armado	2400	400433,0	kg	1,92		250			não	não				-0,1	(2011)			
Paredes Internas	1300	60564,0	kg	1,10		1000									-0,1	(2016)		
Paredes divisórias	900	86074,0	kg	1,10											-0,1	0,1		
Blocos cerâmicos 8x25x25	610	56880,0	kg	3,40											-0,1	0,1		
Argamassa	900	86074,0	kg	1,10											-0,1	0,1		
Lã de rocha 5 cm	67	3472,0	kg	20,20											0,8	0,8		
Blocos cerâmicos 8x25x25	610	10312,0	kg	3,40											-0,1	0,1		
Cobertura	67	34866,0	kg	20,20											0,8	0,8		

Continua

Tabela 35 – Dados da ACVCO₂ das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso Italiano.

Estratégia	Elementos construtivos	Materiais	Densidade (kg/m ³)	Quantidade	Unidade	Emissões Iniciais				Emissões de Manutenção			Emissões de Demolição			Emissões de Renuo			
						Fonte	Transporte estratégia (km)	Mão de obra (dias)	N°	Mão de obra (dias)	Atividade	Dias	Transporte (km)	Emissões (kgCO ₂ /kg)	Fonte				
Caso 1	Paredes Externas	X-Lam estrutura vertical	490	102878,0	kg	1,24											0,1		
		Gesso	900	28964,0	kg	0,09												0,0	
	Laje	Lã de rocha 11 cm	67	9473,0	kg	1,26												0,0	
		Fibrocimento	1330	24619,0	kg	0,67	ICE (2011)											0,0	ICE (2011)
	Paredes Internas	X-Lam estrutura horizontal	1300	25102,0	kg	0,15	Eco-Inv (2016)	50	163 dias - 9 pessoas médiamt e por dia	120 dias - 9 pessoas	Remoção e separação dos materiais	75 - 9 pessoas	50					0,1	Eco-Inv (2016)
		Gesso	900	52452,0	kg	0,09	Inv (2016)	1000										18,8	EPD
	Paredes divisorias	Perfis em alumínio	2700	604,0	kg	8,94	EPD											0,0	
		Gesso	900	47710,0	kg	0,09	EPD											0,1	
	Cobertura	Lã de rocha 5 cm	67	3472,0	kg	1,26												0,1	
		X-Lam 16 cm	490	81382,0	kg	1,24												0,1	
Caso 2	Paredes Externas	X-Lam estrutura vertical	490	102878,0	kg	1,24												0,1	
		Gesso	900	28964,0	kg	0,09												0,0	
	Laje	Fibra de madeira 12 cm	177	2132,0	kg	1,46	ICE (2011)											0,0	ICE (2011)
		Fibrocimento	1330	24619,0	kg	0,67	Eco-Inv (2016)	50	160 dias - 9 pessoas médiamt e por dia	120 dias - 9 pessoas	Remoção e separação dos materiais	73 - 9 pessoas	50					0,1	Eco-Inv (2016)
	Paredes Internas	X-Lam estrutura horizontal	1300	25102,0	kg	0,15	Eco-Inv (2016)	1000										0,0	EPD
		Gesso	900	52452,0	kg	0,09	Inv (2016)	1000										18,8	EPD
	Paredes divisorias	Perfis em alumínio	2700	604,0	kg	8,94	EPD											0,0	
		Gesso	900	47710,0	kg	0,09	EPD											0,1	
	Cobertura	Lã de rocha 5 cm	67	3472,0	kg	1,26												0,1	
		X-Lam 16 cm	490	81382,0	kg	1,24												0,1	
Caso 3	Paredes Externas	X-Lam estrutura vertical	490	102878,0	kg	1,24												0,1	
		Gesso	900	28964,0	kg	0,09												0,0	
	Laje	Fibra de madeira 5 cm	137	7100,0	kg	1,46	ICE (2011)											0,0	ICE (2011)
		Fibrocimento	1330	24619,0	kg	0,67	Eco-Inv (2016)	50	157 dias - 9 pessoas médiamt e por dia	84 dias - 9 pessoas	Remoção e separação dos materiais	52 - 9 pessoas	50					0,0	Eco-Inv (2016)
	Paredes Internas	X-Lam estrutura horizontal	1300	25102,0	kg	0,15	Eco-Inv (2016)	1000										0,0	EPD
		Gesso	900	52452,0	kg	0,09	Inv (2016)	1000										0,0	EPD
	Paredes divisorias	Perfis em alumínio	2700	604,0	kg	8,94	EPD											0,0	
		Gesso	900	47710,0	kg	0,09	EPD											0,1	
	Cobertura	Lã de rocha 5 cm	67	3472,0	kg	1,26												0,1	
		X-Lam 16 cm	490	81382,0	kg	1,24												0,1	

Continua

Tabela 36 – Dados da ACCV das estratégias de projeto avaliadas no estudo de caso Italiano.

Estratégia	Elementos construtivos	Materiais	Custos Iniciais				Custos de Manutenção				Custos de Demolição					
			Preço Material (€/m ²)	Transporte estratégia (km)	Código Camera di Commercio	Mão de obra (€)	Preço Material (€/kg)	Código Camera di Commercio	Mão de obra (€)	Preço Material (€/m ³)	Código Camera di Commercio	Mão de obra (€)	Preço Material (€/m ³)	Código Camera di Commercio	Mão de obra (€)	Transporte (km)
Caso 1	Paredes Externas	X-Lam estrutura vertical	30,40		A.01.03.0361											
		Gesso	A.01.04.1310	38,00		A.01.04.1310										
		La de rocha 11 cm	A.01.03.0770 - d	1,70		A.01.03.0770 - d										
		Fibrocimento-mão de obra	A.01.04.1100 - d	248,00		A.01.04.1100 - d										
		Argamassa	A.01.04.0210 - e	207,00	50	A.01.01.0035	46,5	A.01.01.0035	248,00	A.01.04.0210 - e	207,00	46,5	A.01.04.0005 - b	22,5		
		Paredes	X-Lam estrutura horizontal	30,40	250	A.01.03.0361	1000	A.01.01.0025	38,00	A.01.04.1310	38,00	32,7	A.01.04.0005 - a	17	50	
		Gesso	A.01.04.1310	38,00		A.01.04.1310										
		La de rocha 8 cm	A.01.03.0770 - d	1,70		A.01.03.0770 - d										
		divisórias	X-Lam 16 cm	30,40		A.01.03.0361										
		Cobertura	La de rocha 12 cm	1,70		A.01.03.0770 - d										
Caso 2	Paredes Externas	X-Lam estrutura vertical	30,40		A.01.03.0361											
		Gesso	A.01.04.1310	38,00		A.01.04.1310										
		Fibra de madeira 12 cm	A.01.03.0755 - a-b	2,88		A.01.03.0755 - a-b										
		Fibrocimento-mão de obra	A.01.04.1100 - d	248,00		A.01.04.1100 - d										
		Argamassa	A.01.04.0210 - e	207,00	50	A.01.01.0035	46,5	A.01.01.0035	248,00	A.01.04.0210 - e	207,00	46,5	A.01.04.0005 - a	17	50	
		Paredes	X-Lam estrutura horizontal	30,40	250	A.01.03.0361	1000	A.01.01.0025	38,00	A.01.04.1310	38,00	32,7	A.01.04.0005 - a	17		
		Gesso	A.01.04.1310	38,00		A.01.04.1310										
		Paredes	Fibra de madeira 5 cm	2,88		A.01.03.0361										
		divisórias	X-Lam 16 cm	30,40		A.01.03.0361										
		Cobertura	Gesso em concreto armado	38,00		A.01.03.0755 - a-b										
Caso 3	Paredes Externas	Blocos em concreto celular	37,10		A.01.04.1310											
		Fibrocimento-mão de obra	A.01.03.0361 - b	248,00		A.01.03.1245										
		Argamassa	A.01.03.1245	68,70		A.01.03.1245										
		Vigas em concreto armado	A.01.04.0210 - e	207,00	50	A.01.01.0035	46,5	A.01.01.0035	248,00	A.01.04.1100 - d	248,00	46,5	A.01.04.0005 - b	22,5		
		Blocos cerâmicos	A.01.03.0220 - f	157,00	250	A.01.03.0220 - f	1000	A.01.01.0025	68,70	A.01.03.1245	68,70	32,7	A.01.04.0005 - a	17	50	
		Capa de concreto armado	A.01.03.0220 - f	207,00		A.01.03.1245										
		Paredes	Argamassa	A.01.03.1245	68,70	A.01.03.1245										
		Internas	Blocos cerâmicos 8x25x25	36,10		A.01.03.0135 - c										
		Paredes	Argamassa	A.01.03.1245	68,70	A.01.03.0135 - c										
		divisórias	La de rocha 5 cm	1,70		A.01.03.0770 - d										
	Cobertura	Blocos cerâmicos 8x25x25	36,10		A.01.03.0135 - c											
		La de rocha 12 cm	1,70		A.01.03.0770 - d											

Continua

APÊNDICE D – Resultados no estudo de caso brasileiro

A seguir são apresentados os principais resultados da edificação estudo de caso brasileira nas cidades de Curitiba e Belém nos quatro parâmetros do método. Na parte final são apresentados todos os resultados obtidos nas três cidades brasileiras.

- Parâmetro de conforto

Primeiramente são apresentados os resultados do parâmetro de conforto (Figuras 65, 66, 67 e 68)

Figura 65 – Média anual das horas de conforto térmico na edificação com as estratégias de projeto na cidade de Curitiba.

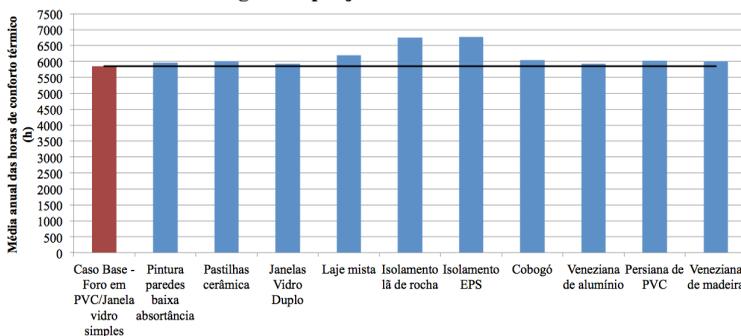


Figura 66 – Média anual das horas de conforto térmico na edificação com as estratégias de projeto na cidade de Belém.

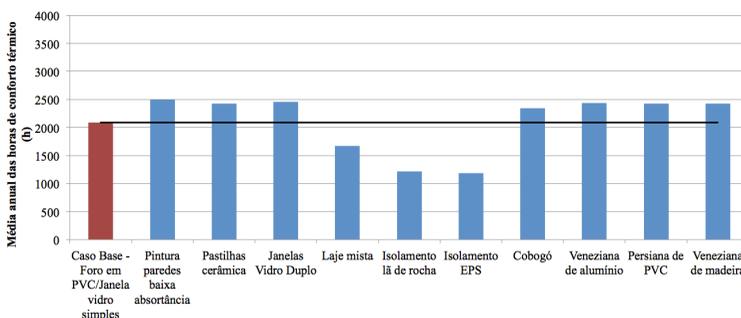


Figura 67 – Balanço das horas de conforto nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Curitiba.

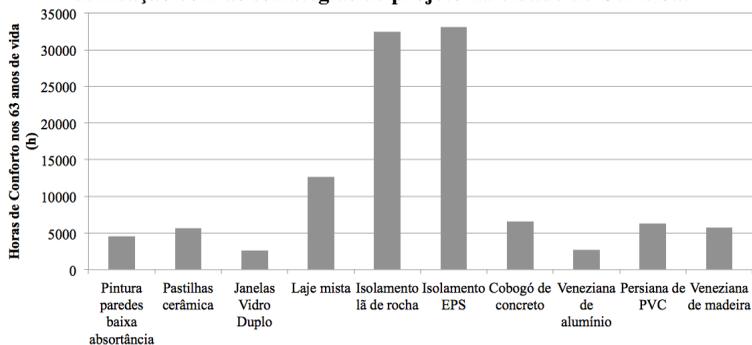
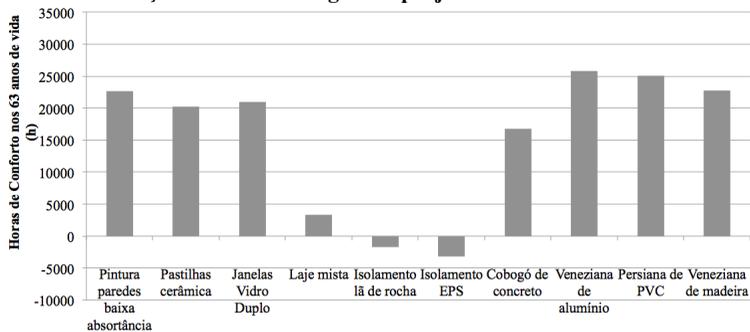


Figura 68 – Balanço das horas de conforto nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias de projeto na cidade de Belém.



- Parâmetro energético

Em seguida são apresentados os resultados do parâmetro energético nas cidades de Curitiba e Belém (Figuras 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76 e 77).

Figura 69 – Consumo anual de energia para o condicionamento da edificação com e sem as estratégias de projeto na cidade de Curitiba, atual e futuro.

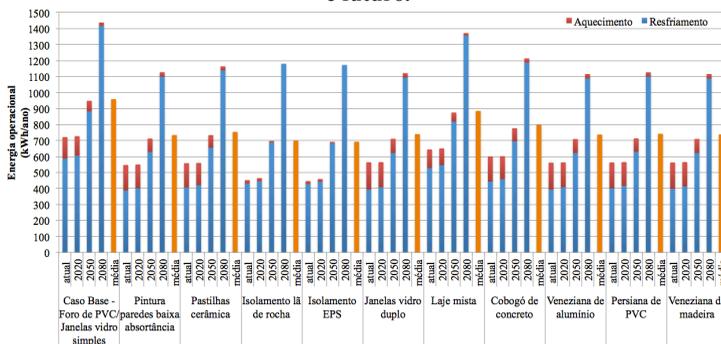


Figura 70 – Consumo anual de energia para o condicionamento da edificação com e sem as estratégias de projeto na cidade de Belém, atual e futuro.

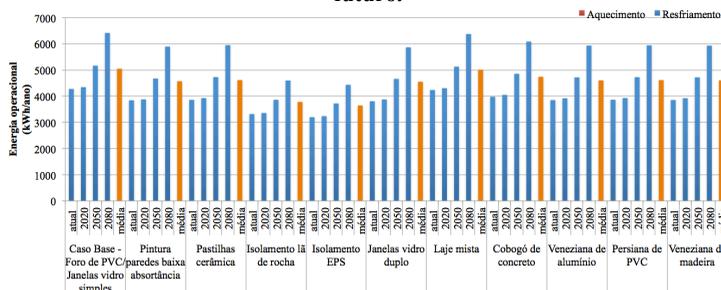


Figura 71 – Consumo anual médio de energia para condicionamento da edificação com e sem estratégias em Curitiba.

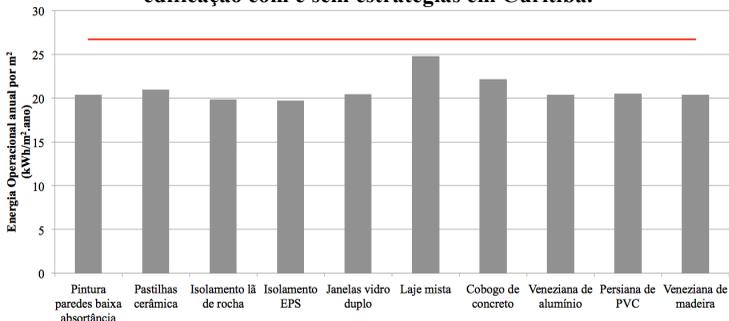


Figura 72 – Consumo anual médio de energia para condicionamento da edificação com e sem estratégias em Belém

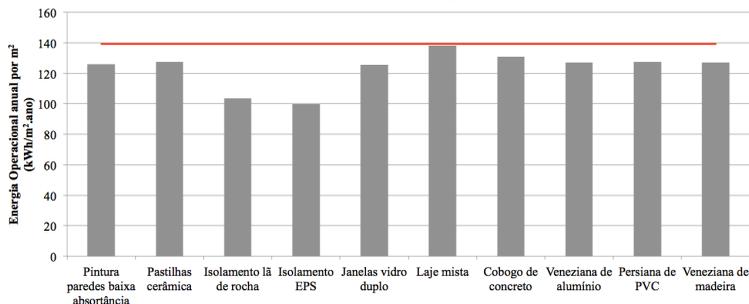


Figura 73 – Energia economizada nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias em Curitiba.

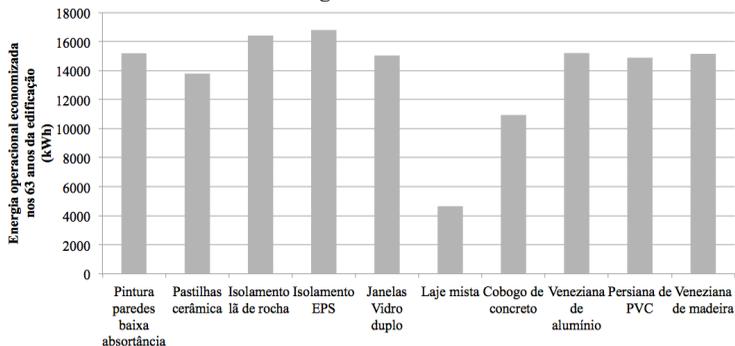


Figura 74 – Energia economizada nos 63 anos de vida da edificação com as estratégias em Belém.

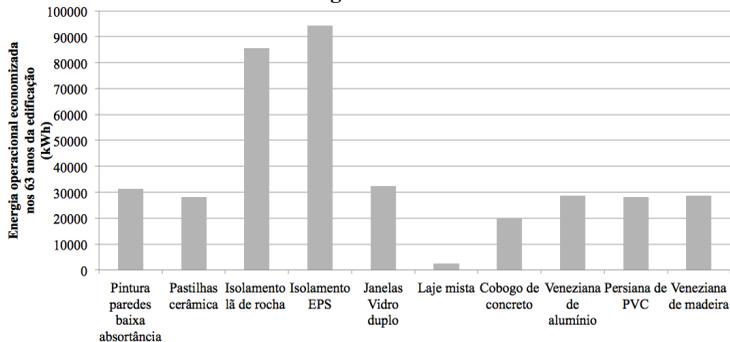


Figura 75 – Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Florianópolis com a fase de reuso.

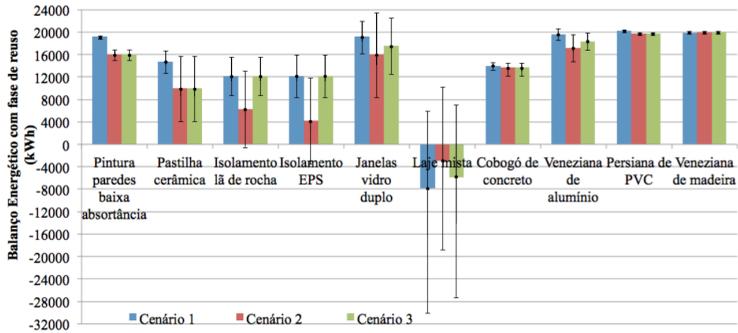
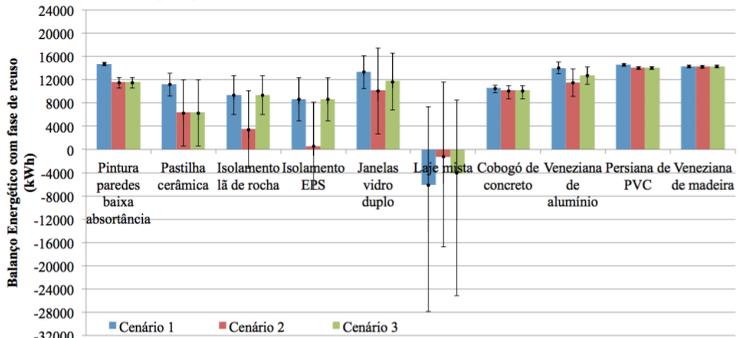
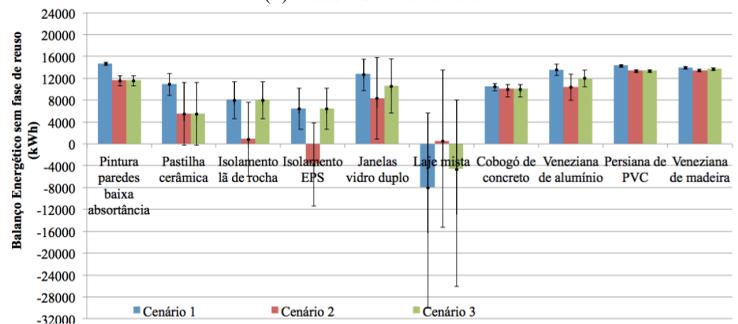


Figura 76 – Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Curitiba com e sem a fase de reuso.

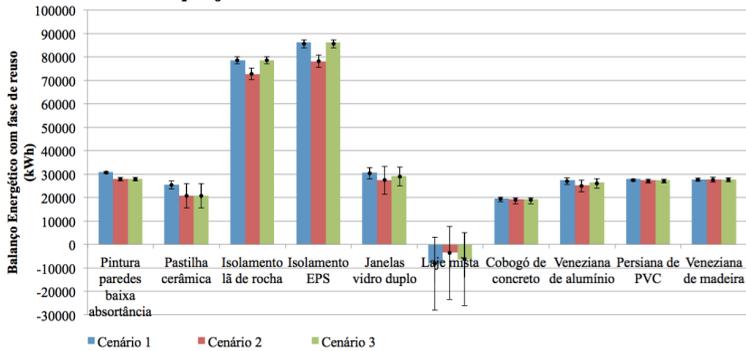


(a) Com a fase de reuso

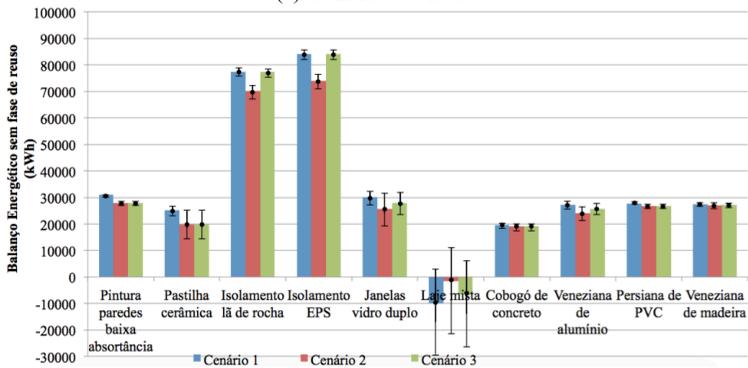


(b) Sem a fase de reuso

Figura 77 – Balanço energético da edificação com as diferentes estratégias de projeto em Belém com e sem fase de reuso.



(a) Com fase de reuso



(b) Sem fase de reuso

- Parâmetro das emissões de CO_2

A seguir são apresentados os resultados do parâmetro das emissões nas cidades de Curitiba e Belém (Figuras 78, 79, 80 e 81).

Figura 78– Emissões evitadas da edificação com as estratégias de projeto em Curitiba.

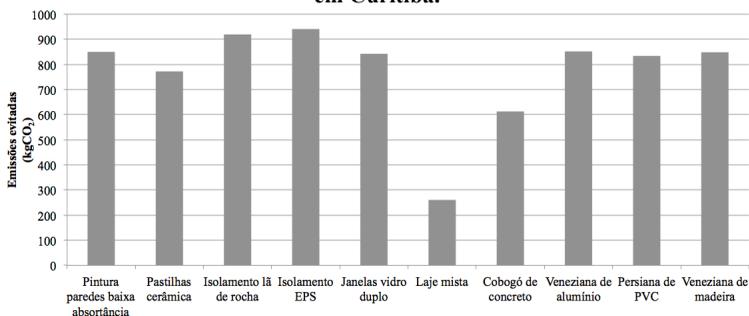


Figura 79– Emissões evitadas da edificação com as estratégias de projeto em Belém.

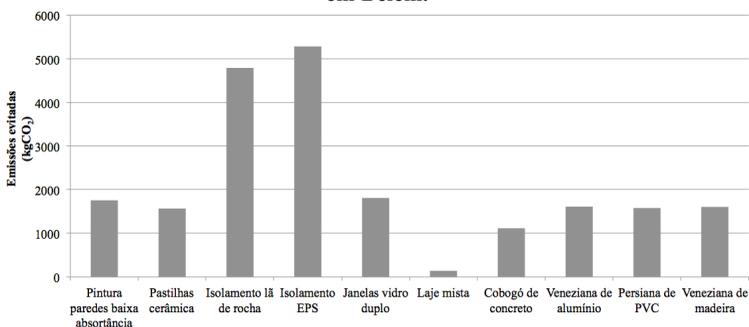


Figura 80 – Balanço das emissões de CO₂ da edificação com as estratégias de projeto em Curitiba.

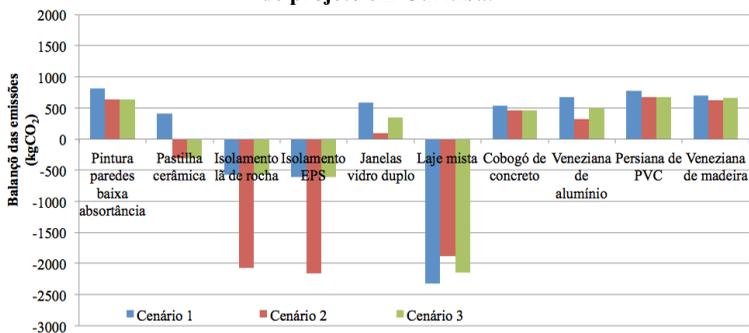
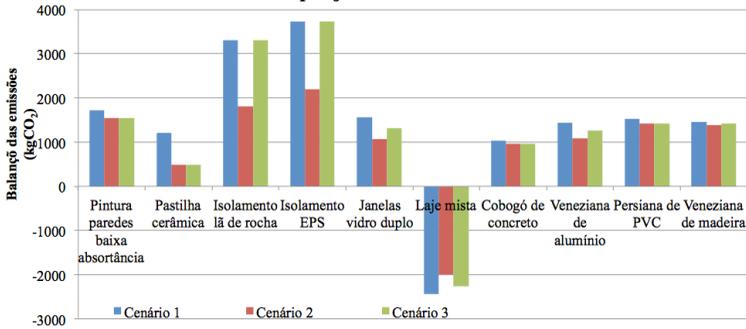


Figura 81 – Balanço das emissões de CO₂ da edificação com as estratégias de projeto em Belém.



- Parâmetro de custo

A seguir são apresentados os resultados do parâmetro de custo nas cidades de Curitiba e Belém (Figuras 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92 e 93).

Figura 82 – Custo inicial das estratégias de projeto na cidade de Curitiba.

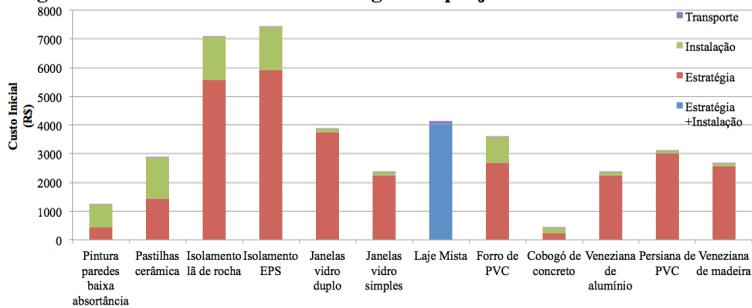


Figura 83 – Custo inicial das estratégias de projeto na cidade de Belém.

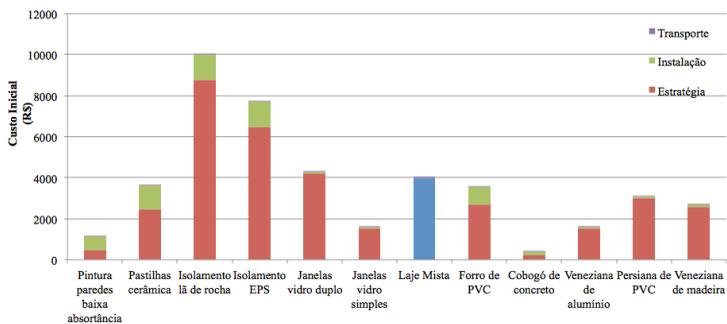


Figura 84 – Economia financeira na fase operacional da edificação em Curitiba.

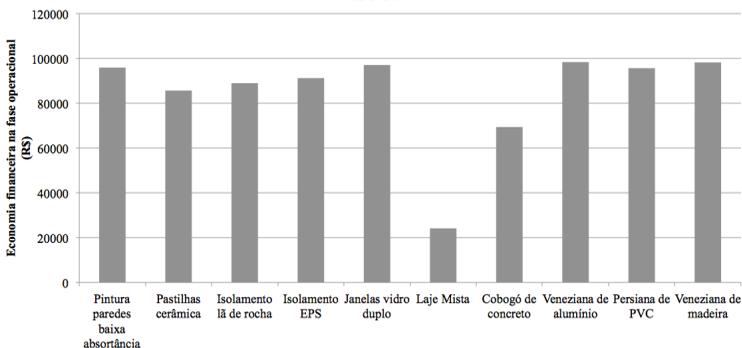


Figura 85 – Economia financeira na fase operacional da edificação em Belém.

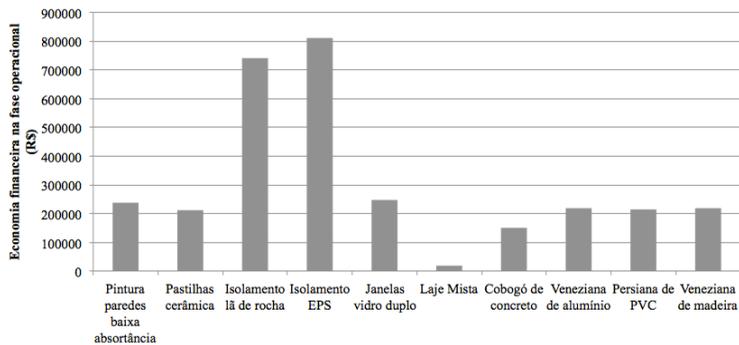


Figura 86 – Custo de manutenção das estratégias de projeto na cidade de Curitiba.

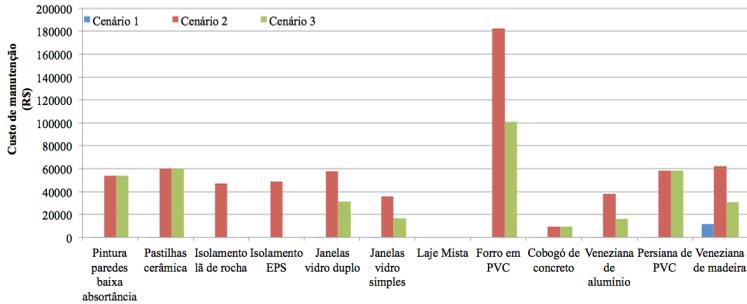


Figura 87 – Custo de manutenção das estratégias de projeto na cidade de Belém.

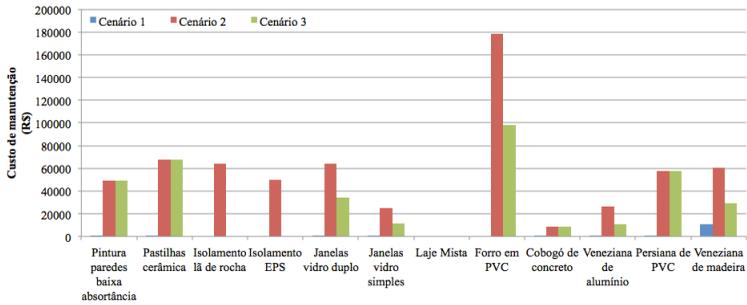


Figura 88 – Custo de desconstrução das estratégias de projeto na cidade de Curitiba.

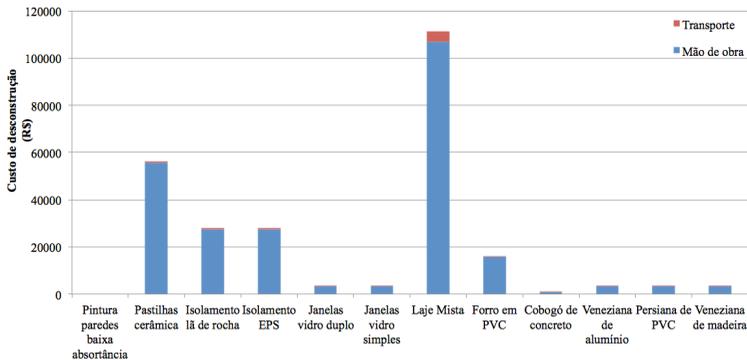


Figura 89 – Custo de desconstrução das estratégias de projeto na cidade de Belém.

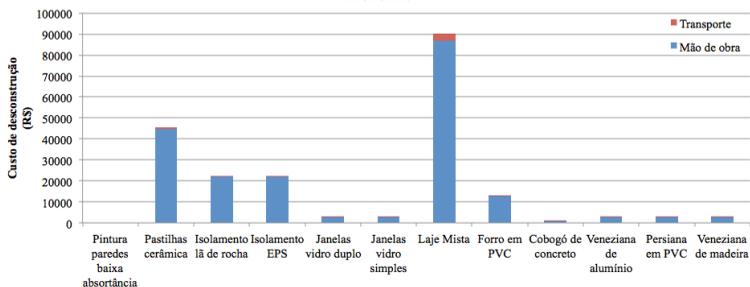
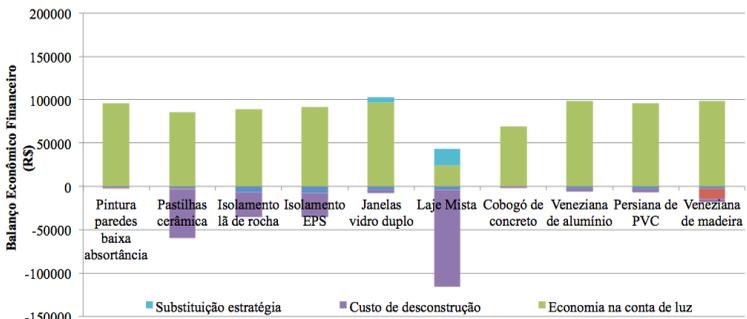
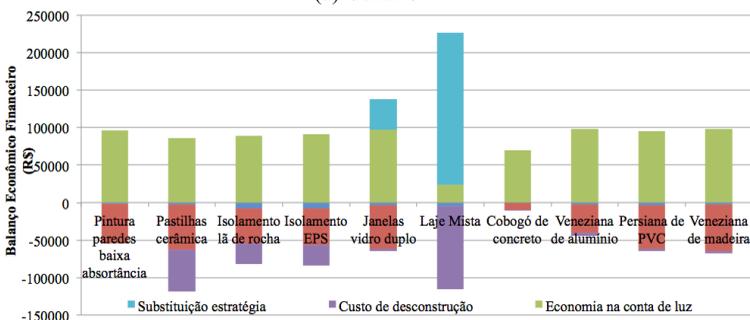


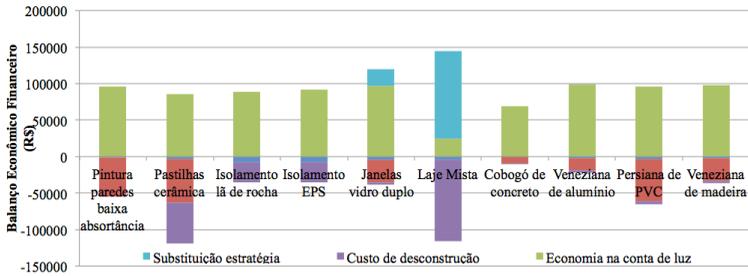
Figura 90 – Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos diferentes cenários na cidade de Curitiba.



(a) Cenário 1

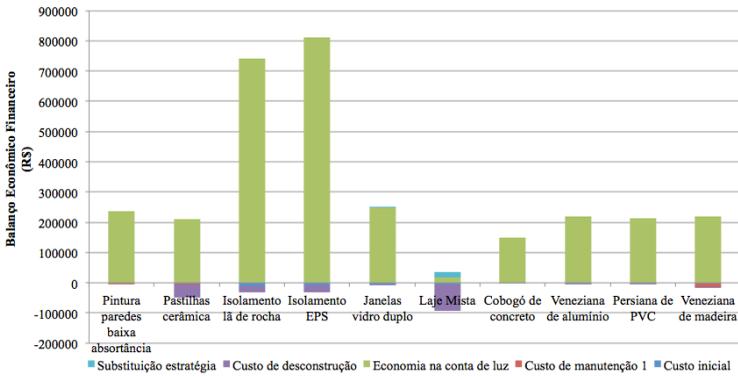


(b) Cenário 2

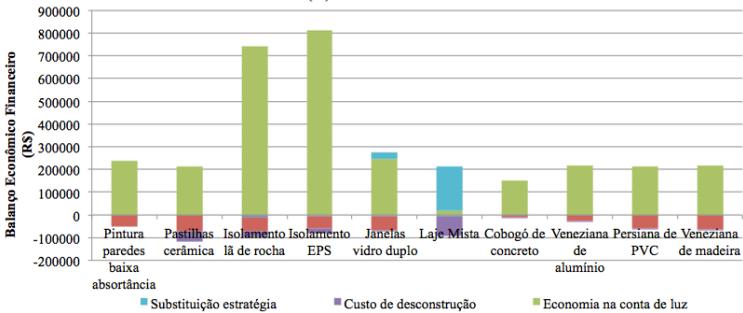


(c) Cenário 3

Figura 91 – Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos diferentes cenários na cidade de Belém.



(a) Cenário 1



(b) Cenário 2

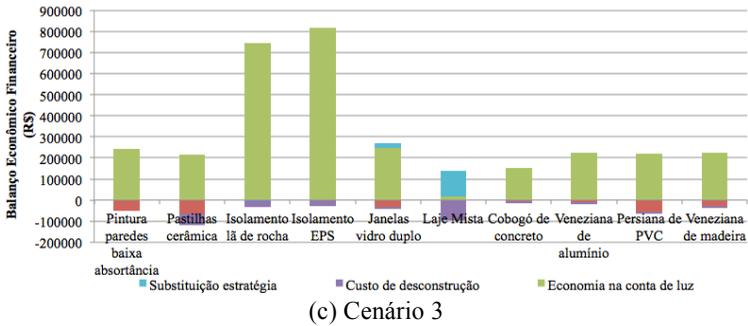


Figura 92 – Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos três cenários na cidade de Curitiba

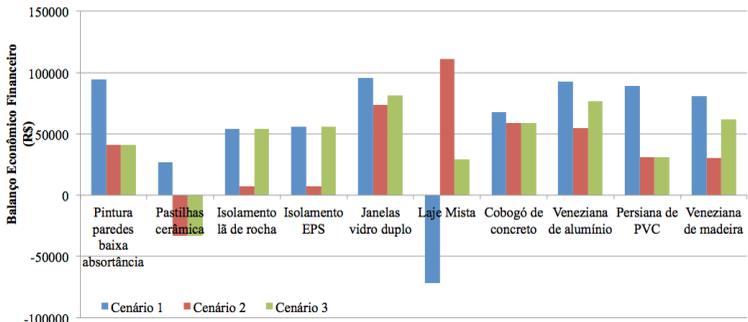
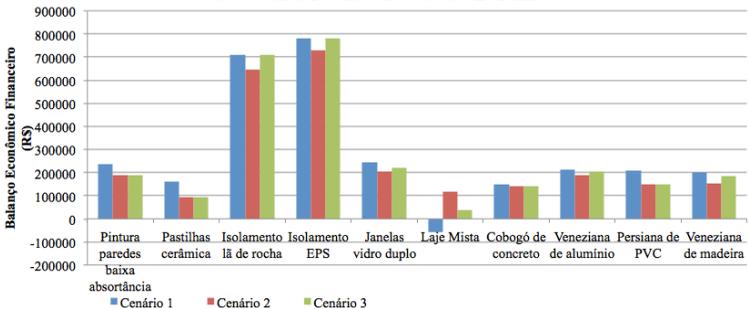


Figura 93 – Balanço econômico financeiro das estratégias de projeto nos três cenários na cidade de Belém.



- Análise das estratégias de projeto na edificação estudo de caso através dos quatro parâmetros de sustentabilidade

A seguir são apresentados os resultados dos quatro parâmetros utilizados na avaliação das estratégias de projeto na edificação nas cidades de Curitiba e Belém (Figuras 94, 95, 96, 97, 98 e 99).

Figura 94 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 1 em Curitiba.

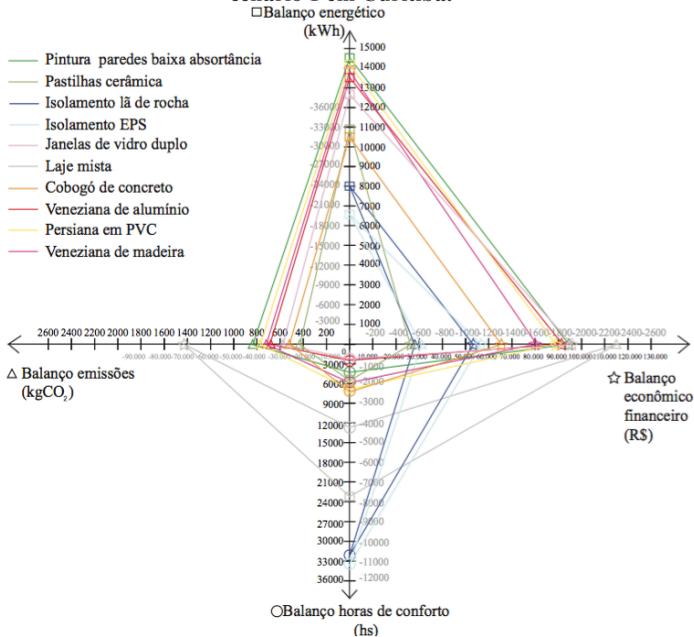


Figura 95 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 2 em Curitiba.

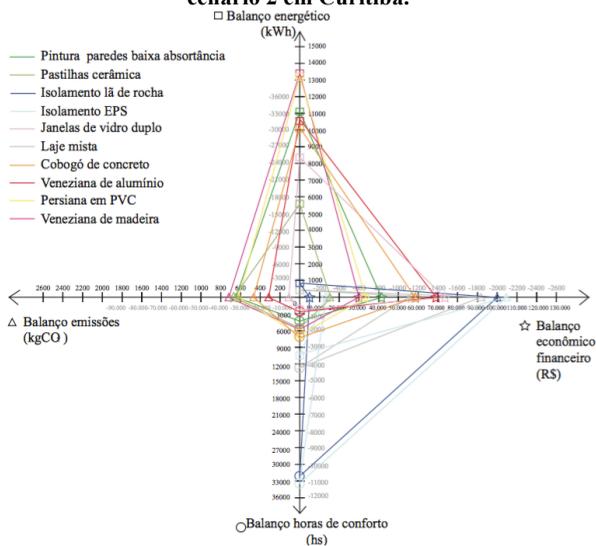


Figura 96 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 3 em Curitiba.

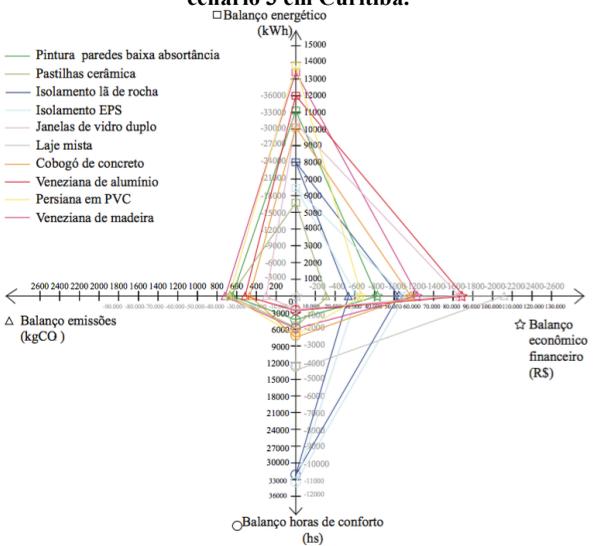


Figura 97– Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 1 em Belém.

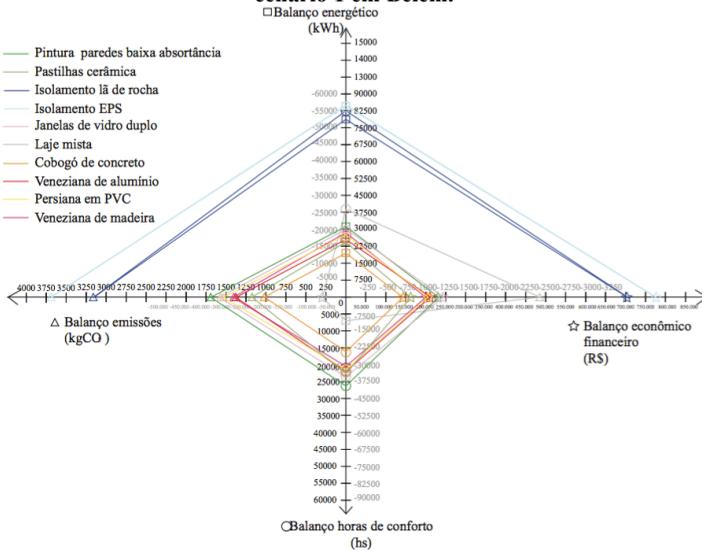


Figura 98 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 2 em Belém.

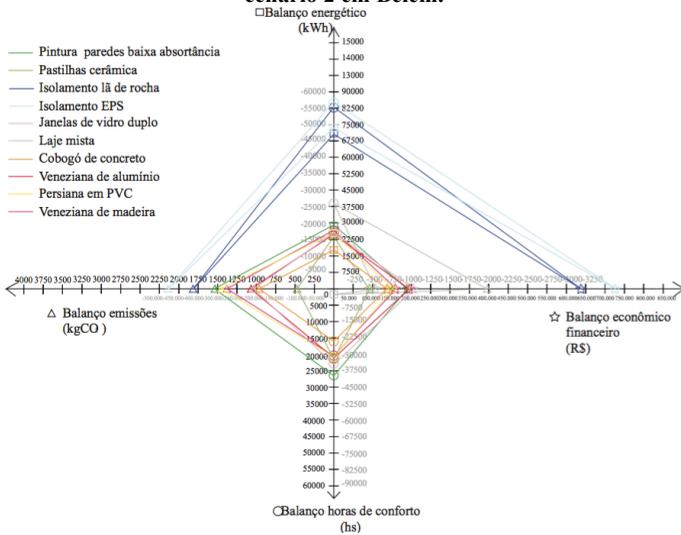
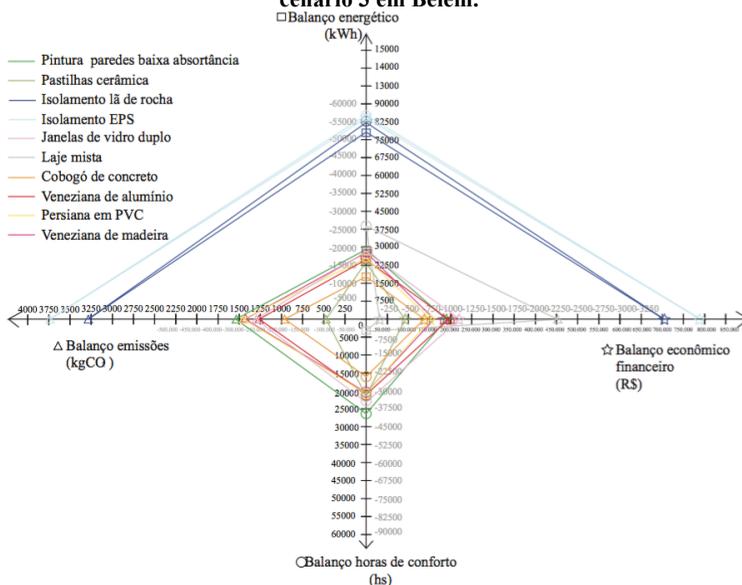


Figura 99 – Resultados das estratégias de projeto nos quatro parâmetros no cenário 3 em Belém.



- Escolha da melhor solução de projeto através do método de tomada de decisão multicritério.

A seguir são apresentados os resultados das estratégias de projeto aplicadas na edificação alcançados através do método de tomada de decisão multicritério (Figuras 100, 101, 102, 103, 104 e 105).

Figura 100 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Curitiba no cenário 1.

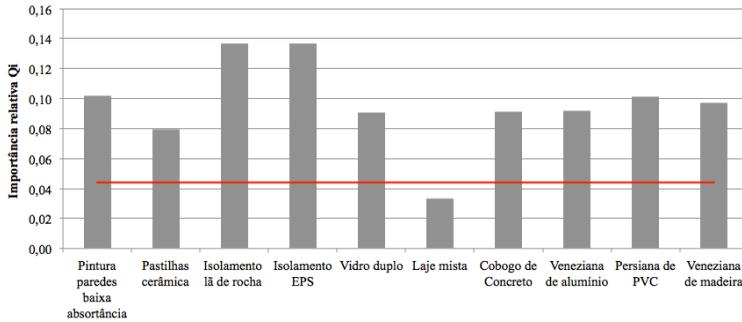


Figura 101 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Curitiba no cenário 2.

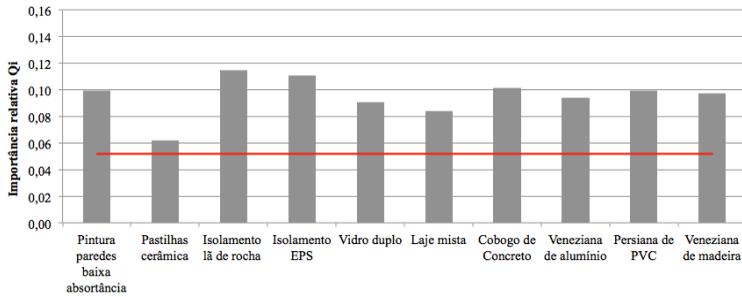


Figura 102 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Curitiba no cenário 3.

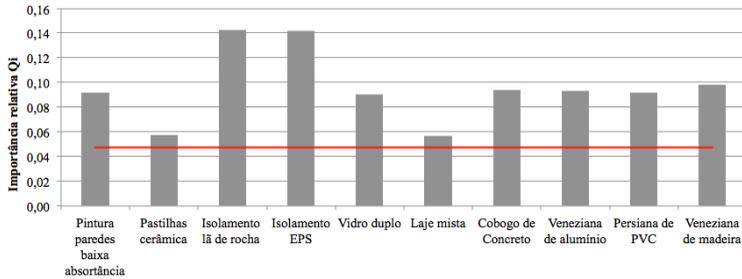


Figura 103– Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Belém no cenário 1.

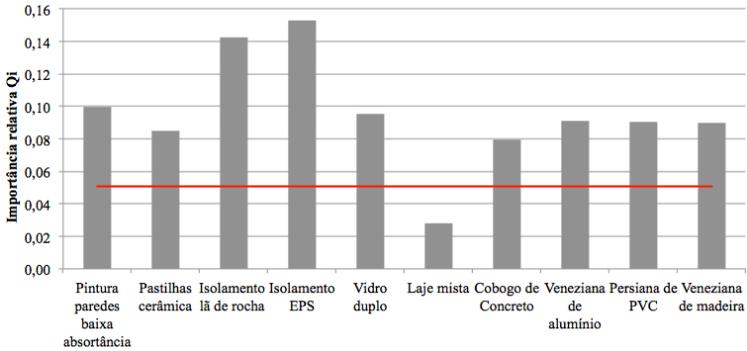


Figura 104 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Belém no cenário 2.

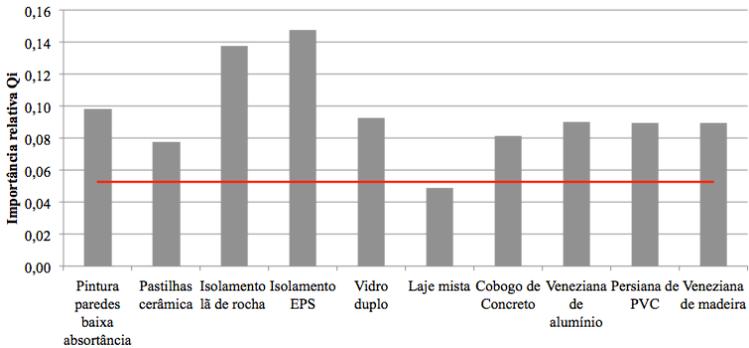
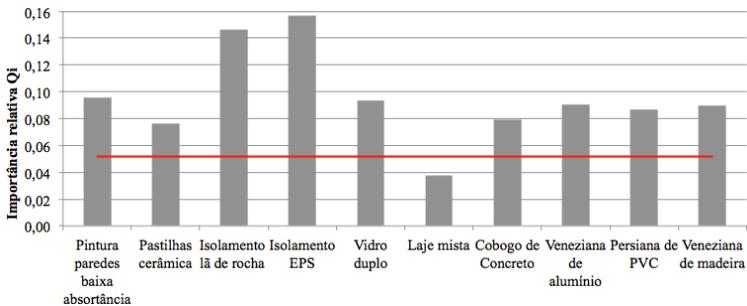


Figura 105 – Importância relativa Q_i das soluções de projeto no estudo de caso em Belém no cenário 3.



As Tabelas 37, 38, 39, 40, 41 e 42 apresentam os resultados obtidos das estratégias de projeto no estudo de caso brasileiro nas cidades de Florianópolis, Curitiba e Belém.

Tabela 37 – Resumo dos resultados nos quatro parâmetros das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Florianópolis.

Parâmetros	Conforto (h)	Energético (kWh)			Emissões (kgCO ₂)			Custo (R\$)		
		Cenários			Cenários			Cenários		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Pintura paredes baixa absorvância	22617	19158	16078	16078	1061	888	888	117527	70062	70062
Pastilha cerâmica	20238	14498	9107	9107	609	-110	-110	58633	7633	7633
Isolamento lâ de rocha	-1758	10807	3649	10807	-422	-1915	-422	98348	50992	98348
Isolamento EPS	-3150	10103	-15	10103	-406	-1955	-406	109488	67396	109488
Vidro duplo	20963	18607	14195	16401	917	417	667	126562	104800	113225
Laje mista	3354	-9564	-1220	-6227	-2417	-1975	-2240	-59784	70350	12072
Cobogó de Concreto	16758	14009	13630	13630	731	655	655	86422	76687	76687
Veneziana de alumínio	25751	19181	16007	17594	985	640	813	123772	100684	114073
Persiana de PVC	25058	19989	19013	19013	1093	990	990	118749	60943	60943
Veneziana de madeira	22711	19647	19120	19384	1021	938	979	112950	75039	98647

Tabela 38 – Resumo dos resultados nos quatro parâmetros das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Curitiba.

Parâmetros	Conforto (h)	Energético (kWh)			Emissões (kgCO ₂)			Custo (R\$)		
		Cenários			Cenários			Cenários		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Pintura paredes baixa absorvância	4509	14716	11636	11636	812	639	639	94587	41021	41021
Pastilha cerâmica	5679	10932	5541	5541	409	-310	-310	26546	-33053	-33053
Isolamento lâ de rocha	32400	8078	920	8078	-574	-2068	-574	53854	6905	53854
Isolamento EPS	33102	6498	-3620	6498	-608	-2157	-608	55936	13844	55936
Vidro duplo	2601	12800	8387	10593	591	91	341	95561	73799	82224
Laje mista	12636	-7863	481	-4525	-2322	-1879	-2145	-71810	58324	46
Cobogó de Concreto	6957	10525	10146	10146	536	460	460	67921	58186	58186
Veneziana de alumínio	2673	13586	10412	11999	672	326	499	92623	69534	82924
Persiana de PVC	6327	14365	13389	13389	778	675	675	89149	31343	31343
Veneziana de madeira	5787	13979	13452	13716	703	620	662	80490	30214	61521

Tabela 39 – Resumo dos resultados nos quatro parâmetros das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Belém.

Parâmetros	Conforto (h)	Energético (kWh)			Emissões (kgCO ₂)			Custo (R\$)		
		Cenários			Cenários			Cenários		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Pintura paredes baixa absorvância	26097	30927	27847	27847	1720	1547	1547	236230	187019	187019
Pastilha cerâmica	21294	25176	19785	19785	1207	488	488	162242	94919	94919
Isolamento lâ de rocha	-55203	77261	70104	77261	3300	1806	3300	708093	644037	708093
Isolamento EPS	-56731	84104	73987	84104	3738	2189	3738	780607	730626	780607
Vidro duplo	23451	30101	25689	27894	1560	1060	1310	244436	205169	221725
Laje mista	-26475	-9996	-1653	-6659	-2441	-1999	-2264	-59361	112753	35676
Cobogó de Concreto	15781	19525	19146	19146	1040	964	964	148856	140035	140035
Veneziana de alumínio	21908	27181	24007	25594	1433	1088	1261	214116	188039	203159
Persiana de PVC	21483	27686	26710	26710	1524	1421	1421	208413	150712	150712
Veneziana de madeira	21042	27519	26992	27256	1461	1379	1420	202619	152305	183636

Tabela 40 – Importância relativa Q_i e índice de prioridade P_i das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Florianópolis.

Parâmetros	Importância relativa Q_i			Índice P_i		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	1	2	3	1	2	3
Pintura paredes baixa absorvância	0,121	0,118	0,113	99%	95%	91%
Pastilha cerâmica	0,098	0,086	0,082	79%	69%	67%
Isolamento lâ de rocha	0,071	0,056	0,075	58%	45%	61%
Isolamento EPS	0,071	0,053	0,075	58%	43%	61%
Vidro duplo	0,117	0,116	0,116	95%	94%	94%
Laje mista	0,020	0,061	0,040	16%	49%	32%
Cobogó de Concreto	0,099	0,105	0,100	80%	85%	81%
Veneziana de alumínio	0,123	0,124	0,124	100%	100%	100%
Persiana de PVC	0,122	0,118	0,114	99%	96%	92%
Veneziana de Madeira	0,118	0,119	0,119	96%	96%	96%

Tabela 41 – Importância relativa Q_i e índice de prioridade P_i das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Curitiba.

Parâmetros	Importância relativa Q_i			Índice P_i		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Pintura paredes baixa absorvância	0,102	0,100	0,092	75%	87%	65%
Pastilha cerâmica	0,079	0,062	0,058	58%	54%	40%
Isolamento lâ de rocha	0,137	0,115	0,142	100%	100%	100%
Isolamento EPS	0,137	0,111	0,142	100%	97%	100%
Vidro duplo	0,091	0,091	0,090	66%	79%	63%
Laje mista	0,033	0,084	0,057	24%	73%	40%
Cobogó de Concreto	0,091	0,101	0,094	67%	88%	66%
Veneziana de alumínio	0,092	0,094	0,093	67%	82%	66%
Persiana de PVC	0,101	0,099	0,092	74%	86%	65%
Veneziana de Madeira	0,097	0,097	0,098	71%	85%	69%

Tabela 42– Importância relativa Q_i e índice de prioridade P_i das estratégias de projeto aplicadas na edificação na cidade de Belém.

Parâmetros	Importância relativa Q_i			Índice P_i		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Pintura paredes baixa absorvância	0,100	0,098	0,096	65%	67%	61%
Pastilha cerâmica	0,085	0,078	0,076	56%	53%	48%
Isolamento lâ de rocha	0,143	0,137	0,147	93%	93%	93%
Isolamento EPS	0,153	0,148	0,157	100%	100%	100%
Vidro duplo	0,095	0,093	0,093	62%	63%	60%
Laje mista	0,028	0,049	0,038	18%	33%	24%
Cobogó de Concreto	0,079	0,081	0,079	52%	55%	51%
Veneziana de alumínio	0,091	0,090	0,090	59%	61%	58%
Persiana de PVC	0,091	0,089	0,087	59%	61%	55%
Veneziana de Madeira	0,090	0,089	0,090	59%	61%	57%

APÊNDICE E – Resultados do estudo de caso italiano.

A seguir são apresentados os resultados detalhados da edificação estudo de caso italiana na cidade de Milão nos quatro parâmetros do método.

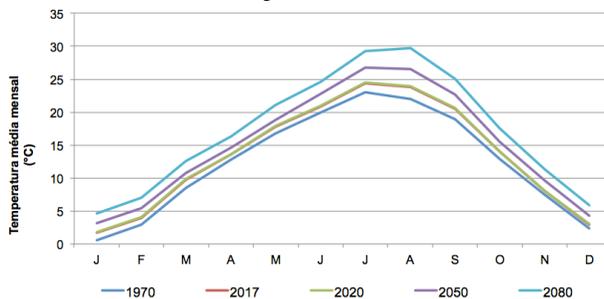
A apresentação dos resultados segue a modalidade utilizada no estudo de caso brasileiro, onde primeiramente foi apresentada a análise das condições climáticas futuras da cidade de Milão e sucessivamente foram avaliadas as estratégias de projeto aplicadas na edificação nos quatro parâmetros da sustentabilidade.

• Análise das condições climáticas futuras

Nesta análise foram avaliadas exclusivamente as médias mensais da temperatura, da umidade relativa e da radiação direta horizontal em cinco diferentes períodos: 1970 (ano do arquivo climático), 2017, 2020, 2050 e 2080.

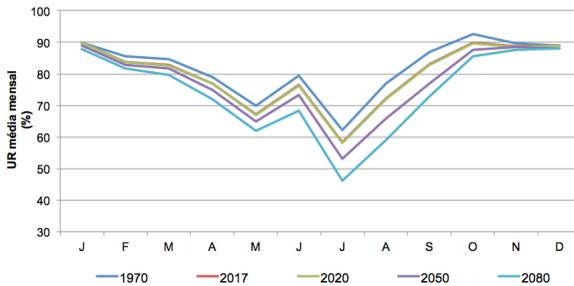
A Figura 106 apresenta a comparação da temperatura média mensal em Milão nos cinco diferentes períodos. A temperatura média mensal aumentará nos próximos anos. Assim, enquanto a variação de temperatura entre 2017 e 2020 será mínima ($0,07^{\circ}\text{C}$), em 2050 e 2080 a temperatura média anual aumentará de $1,6^{\circ}\text{C}$ e $3,6^{\circ}\text{C}$, respectivamente, em comparação com 2017. Além disso a Figura 87 mostra as temperaturas médias de 1970, ano do arquivo climático, evidenciando que esta variação será ainda maior, $4,7^{\circ}\text{C}$ de aumento da temperatura média anual em 2080.

Figura 106 – Temperatura média mensal na cidade de Milão nos diferentes períodos.



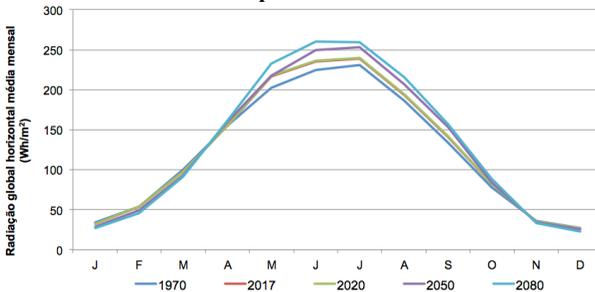
A Figura 107 apresenta a comparação da umidade relativa média mensal nos cinco períodos. Percebeu-se que, a umidade relativa diminuirá nos próximos anos. Em comparação com 2017 a umidade média anual diminuirá 2,7% e 5,7%, em comparação, respectivamente, com os anos de 2050 e 2080. Em comparação com 1970, em 2080 a redução da umidade média anual será de 7,9%.

Figura 107 – Umidade média mensal na cidade de Milão nos diferentes períodos.



A Figura 108 apresenta a comparação da radiação global média mensal em Milão nos cinco períodos. Em comparação com 2017, a radiação global nos próximos 60 anos terá um aumento de 3,8 Wh/m^2 e 7,2 Wh/m^2 , respectivamente, em 2050 e 2080. O aumento da radiação entre 1970 e 2080 será ainda mais significativo, estimado em 11,1 Wh/m^2 .

Figura 108 – Radiação global mensal na cidade de Milão nos diferentes períodos.



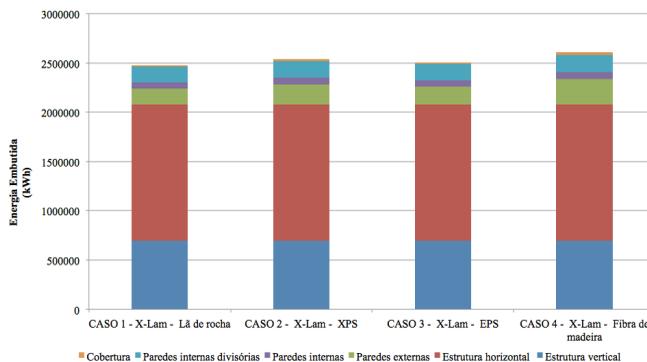
A análise dos arquivos climáticos futuros utilizados na pesquisa mostrou os efeitos das mudanças climáticas na cidade de Milão. Percebeu-se que, como nas cidades brasileiras, nos próximos 60 anos haverá um aumento das temperaturas externas associadas a uma redução da umidade relativa e a um aumento da radiação global. Considerando as vidas úteis das edificações estas mudanças devem ser consideradas desde as primeiras fases de projeto.

- **Escolha das seis soluções de projeto**

Nesta primeira fase, os dezoito estudos de caso iniciais foram avaliados exclusivamente na fase inicial do ciclo de vida energético. Para isso foi utilizado exclusivamente o valor médio da energia embutida das três bases de dados. A energia para o transporte das estratégias assim como a energia gasta pela mão de obra não foram avaliadas.

Primeiramente são apresentados os resultados da energia embutida dos quatro estudos de caso da edificação com estrutura em X-Lam. A Figura 109 apresenta os resultados da energia embutida dos quatro estudos de casos.

Figura 109 – Energia embutida nos quatro estudos de caso com estrutura em X-Lam.

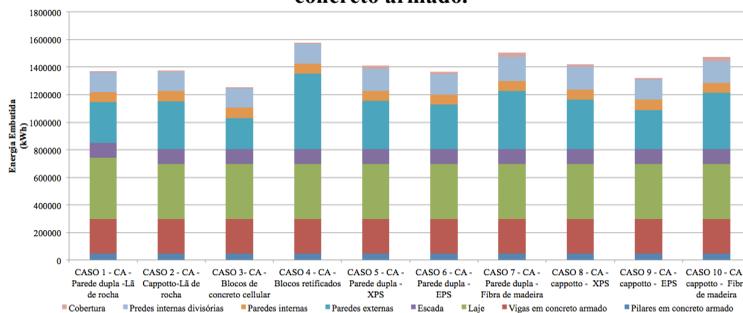


A melhor solução de projeto foi o caso com o isolamento térmico em lã de rocha, enquanto a pior solução foi a edificação com isolamento em fibra de madeira. Os resultados mostraram que entre as soluções de projeto a diferença foi mínima, porque a única estratégia alterada foi o

tipo de isolante térmico. Entre a melhor e a pior solução a diferença da energia embutida foi de 5%. A estrutura horizontal representou 55% da energia gasta na fase inicial. Isto deveu-se ao uso do X-Lam como solução estrutural dos elemento horizontais.

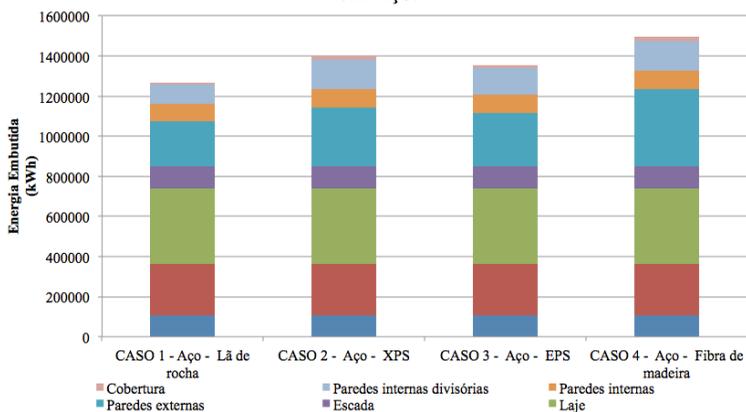
Após a avaliação dos estudos de caso com estrutura em X-Lam foram avaliadas as soluções da edificação com a estrutura em concreto armado. A Figura 111 apresenta os resultados das dez soluções de projeto com a estrutura em concreto armado. Enquanto a edificação com estrutura em X-Lam apresentou resultados semelhantes, a edificação com as soluções de projeto com estrutura de concreto armado apresentaram resultados diferentes entre si. Assim, a melhor solução de projeto em blocos de concreto celular apresentou energia embutida inferior a 26% em comparação com o caso 4, em tijolos cerâmicos *rettificati* (com funções de isolamento térmico). As paredes externas e a laje de concreto armado juntos representaram cerca de 50% da energia embutida nas soluções de projeto avaliadas na edificação. Os pilares em concreto armado, assim como o isolamento térmico da cobertura foram os elementos que apresentaram menor impacto na energia embutida das dez estratégias.

Figura 110– Energia embutida nos estudos de caso com estrutura em concreto armado.



Enfim, foram avaliadas as quatro soluções de projeto com estrutura em aço. A Figura 111 apresenta os resultados das quatro soluções de projeto na fase inicial do ciclo de vida.

Figura 111 – Energia embutida nos quatro estudos de caso com estrutura em Aço.



Assim como nas soluções de projeto avaliadas na estrutura em X-Lam, também na estrutura em aço a única estratégia que foi alterada foi o isolante térmico. O caso 1, com isolamento térmico com lã de rocha, obteve a menor energia embutida, enquanto o caso 4, com fibra de madeira, resultou como o pior. A melhor solução de projeto obteve uma energia embutida inferior a 14% em comparação com a pior solução. As paredes externas da edificação e a laje em aço foram os elementos com maior energia embutida nos quatro estudos de caso.

Através dessa primeira análise foi possível escolher as seis soluções de projeto que foram avaliadas no ciclo de vida nos quatro parâmetros da sustentabilidade. A Tabela 43 apresenta os seis estudos de caso que foram avaliados nos parâmetros de conforto, energético, econômico financeiro e das emissões de CO₂.

Tabela 43 – Estratégias de projeto a ser avaliada no ciclo de vida nos quatro parâmetros.

Estrutura	Caso	Paredes Externas	Isolante Paredes Externas e Cobertura	Paredes Internas
X-Lam	1 - Base	X-Lam	Lã de rocha	X-Lam (12 cm)
	2	X-Lam	Fibra de madeira	X-Lam (12 cm)
Concreto Armado	3	Blocos em concreto celular (30cm)	Lã de rocha (somente na cobertura)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
	4	Tijolos cerâmicos <i>rettificati</i> (45 cm)	Lã de rocha (somente na cobertura)	Parede em tijolos cerâmicos (8 cm)
Aço	5	Parede leve: lastra em gesso (int.) e lastra em fibrocimento (ext.)	Lã de rocha	Parede dupla em gesso e camada de ar (10 cm)
	6	Parede leve: lastra em gesso (int.) e lastra em fibrocimento (ext.)	Fibra de madeira	Parede dupla em gesso e camada de ar (10 cm)

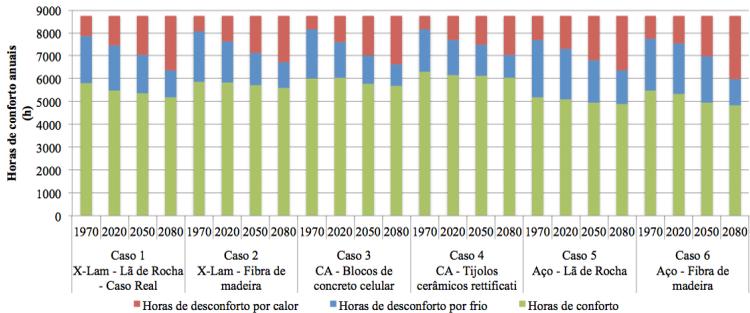
- **Conforto térmico**

O primeiro parâmetro avaliado nas seis soluções de projeto foi do conforto térmico. As seis soluções projetuais foram analisadas considerando também os efeitos das mudanças climáticas na edificação.

A Figura 112 apresenta as horas de conforto e desconforto do usuário da edificação nos seis estudos de caso avaliados. Os resultados mostraram que, nas seis soluções de projeto, as horas de conforto diminuirão com o passar dos anos. Isso deve-se ao contextual aumento das horas de desconforto por calor e a diminuição das horas de desconforto por frio. As horas de desconforto por frio, em 2080 representarão 35% das horas totais de desconforto em comparação com o atual 65%. Da mesma forma as horas de desconforto por calor representarão 65% das horas de desconforto na maioria dos estudos de

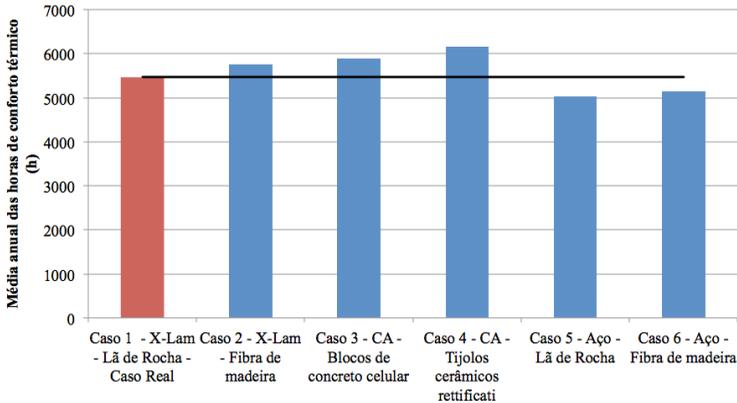
caso avaliados. Este aspecto é de particular interesse para os projetistas, observando a necessidade de não se considerar exclusivamente as problemáticas ligadas ao desconforto por frio mas também ao aumento do desconforto por calor.

Figura 112 – Horas de conforto nos estudos de caso avaliados na cidade de Milão.



A Figura 113 apresenta as horas de conforto médias anuais obtidas com as diferentes soluções de projeto nos 100 anos de vida da edificação. O caso real da edificação é a referência de comparação para os outros casos da edificação com a aplicação da estratégia de projeto. Percebeu-se que as soluções de projeto com a estrutura em aço não aumentaram as horas de conforto do usuário na edificação quando naturalmente ventilada. A edificação nas duas soluções da estrutura em concreto armado e o caso com estrutura em X-Lam com isolamento em fibra de madeira permitiram alcançar melhor desempenho. A edificação com estrutura em concreto armado e a envoltória em tijolos cerâmicos *rettificati* foi a solução que mais aumentou (11%) as horas de conforto.

Figura 113 – Médias anuais das horas de conforto do usuário na edificação nos seis estudos de casos em Milão.



- **Parâmetro energético**

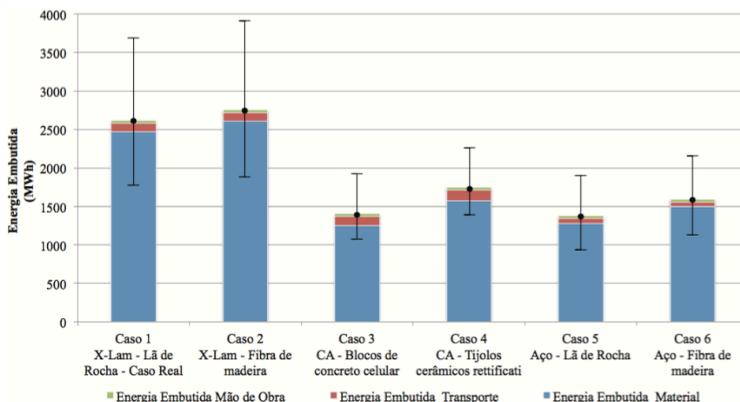
A seguir são apresentados os resultados do ciclo de vida energético das seis soluções de projeto avaliadas nas diferentes fases da ACVE.

- *Energia embutida*

A primeira etapa da ACVE foi a energia embutida. A Figura 114 apresenta os resultados da energia embutida dos seis cenários no estudo de caso em Milão. O estudo de caso que obteve a menor energia embutida foi a estrutura em aço com isolamento térmico em lã de rocha com 1376 MWh, enquanto que a solução de projeto com maior energia embutida foi o caso 2 com 2753 MWh. O fator que mais influenciou a quantidade de energia embutida das estratégias de projeto foi o tipo de material utilizado na envoltória e na estrutura da edificação. A energia de transporte teve participação pequena na energia embutida de todas as estratégias avaliadas, representando de 4,2% (no caso 6) a 9,4% (no caso 3) da energia consumida na fase inicial. Nos casos com estrutura de concreto armado a energia de transporte foi mais relevante devido à maior quantidade de material transportado em comparação com as demais soluções. A energia para a instalação teve participação ainda menor na energia embutida final; chegou a representar 2,9% da energia embutida, no caso 3, até um mínimo de 1,3% da energia embutida, no

caso 2. Mesmo assim, a energia de transporte e da mão de obra, juntos, representaram até 13% da energia embutida nos diferentes cenários. Por esta razão, a avaliação destes dois fatores na fase inicial do ciclo de vida pode ser determinante para a escolha final das estratégias.

Figura 114 – Energia embutida nos estudos de casos da edificação em Milão.

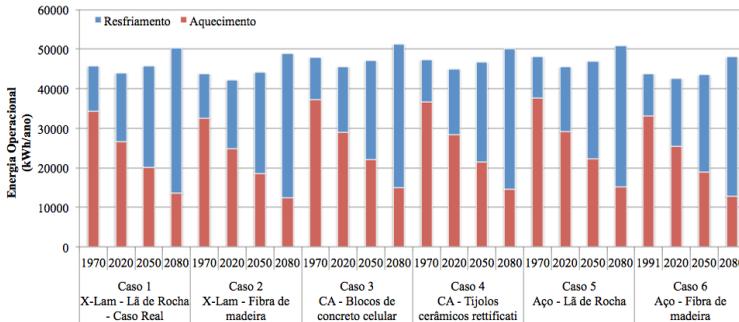


Além disso, a Figura 114 apresenta a variação da energia embutida para cada solução de projeto. Nos diferentes casos avaliados da edificação objeto de estudo, a variação da energia embutida chegou a 53% (caso 3). O cenário com a menor variação foi o caso 4 com uma variação da energia embutida de 46%. Tanto as diferentes bases de dados utilizada quanto a distância do transporte das estratégias de projeto até a edificação representam fatores que influenciam a variação nos resultados finais da energia embutida. Nos casos da edificação com estrutura em concreto armado o transporte influenciou a variação dos resultados da energia embutida em até 54%. Esta variação foi mais sensível nas estratégias onde a quantidade de material foi maior, o que consequentemente provocou aumento no consumo de transporte. Nos outros casos estudados foram as diferentes bases de dados dos materiais que influenciaram de maior forma a variação nos resultados. Este aspecto deve ser considerado na escolha da melhor solução de projeto, privilegiando a solução com a menor variação.

- *Energia operacional*

Os resultados do consumo energético para aquecimento e resfriamento da edificação atual e no futuro estão apresentados na Figura 115.

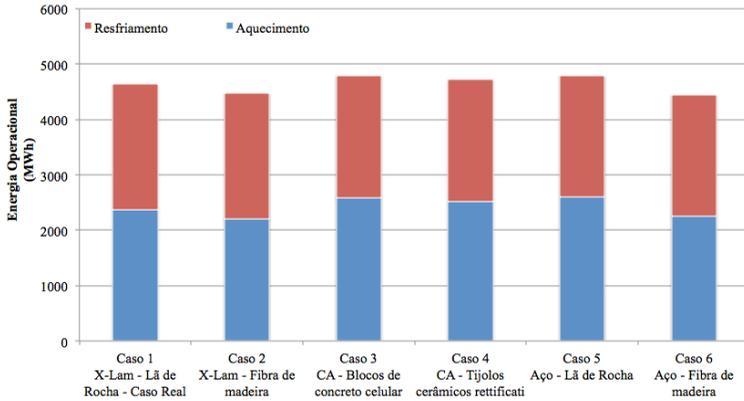
Figura 115 – Energia operacional atual e no futuro dos estudos de casos.



Nos diferentes casos avaliados houve grandes mudanças no consumo para aquecimento e resfriamento no futuro. Pôde-se observar que nos diferentes casos avaliados houve redução do consumo para aquecimento e aumento no consumo para resfriamento. Essa análise está de acordo com a avaliação das horas de conforto do usuário na edificação, onde as horas de desconforto por calor aumentarão e ao mesmo tempo as horas de desconforto por frio diminuirão. Assim, se por um lado o consumo para aquecimento em 2080 diminuirá mediamente em 50% por outro lado o consumo para resfriamento aumentará em 53% em comparação com o consumo atual. O consumo atual da edificação nos diferentes estudos de caso foi em média de $30,7 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$, resultado semelhante aos $24 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ do valor limite para o nível A da certificação energética italiana (ACE, 2006).

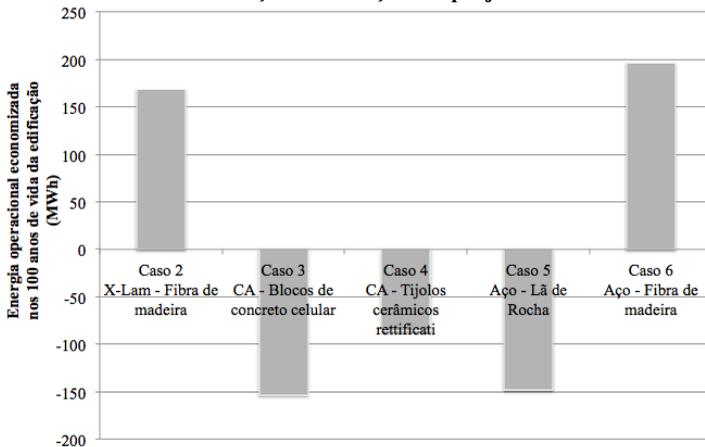
A Figura 116 apresenta os resultados do consumo para resfriamento e aquecimento da edificação nos diferentes estudos de caso nos 100 anos de vida. Percebeu-se que não existe diferença significativa entre os diferentes estudos de caso pois todos os cenários possuem a mesma transmitância térmica da envoltória. O estudo de caso que obteve melhor desempenho foi o caso 6, estrutura em aço com fibra de madeira, com energia operacional de 4444 MWh, enquanto o caso 3, estrutura em concreto armado com blocos celulares na envoltória, obteve o pior desempenho com 4794 MWh.

Figura 116 – Energia operacional média atual e no futuro dos estudos de casos.



A Figura 117 apresenta a energia operacional economizada da edificação nos diferentes estudos de caso em comparação com o caso real da edificação. Entre as cinco soluções de projeto, somente o caso 2 e o caso 6 reduziram o consumo de energia operacional em comparação com o caso real. Os outros três casos apresentaram consumo de energia na fase operacional maior.

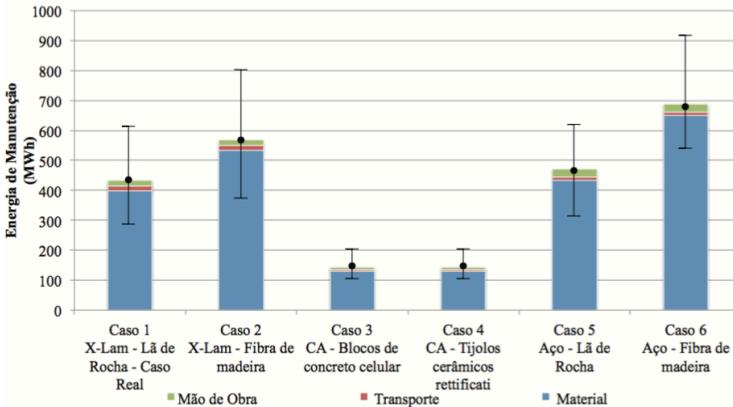
Figura 117 – Energia operacional economizada nos 100 anos de vida da edificação nas soluções de projeto.



- *Energia de manutenção*

Após os resultados da energia operacional nas seis soluções de projeto, a Figura 118 apresenta os resultados da energia de manutenção.

Figura 118 – Energia de manutenção nos estudos de casos da edificação em Milão.



Entre as soluções de projeto o caso 6, com estrutura em aço e fibra de madeira, apresentou a energia de manutenção maior com 688 MWh, enquanto as duas soluções de projeto com estrutura em concreto armado obtiveram o melhor resultado, com 144 MWh. Percebeu-se que as soluções de projeto onde os materiais exigem a substituição ao longo da vida útil da edificação, obtiveram pior desempenho na energia de manutenção. Nas soluções de projeto em X-Lam e em aço a substituição dos materiais isolantes e das paredes internas e externas em material leve (gesso e fibrocimento), aumentaram a energia de manutenção consumida. Também na fase de manutenção a energia gasta para a produção das soluções de projeto foi a causa principal no consumo de energia. Diferente do observado na fase inicial, na fase de manutenção a energia para a instalação teve peso maior em comparação com a energia de transporte. Nos casos com estrutura em concreto armado chegou a representar 7% da energia de manutenção, enquanto o transporte, com a distância considerada de 250 km, apenas 5%.

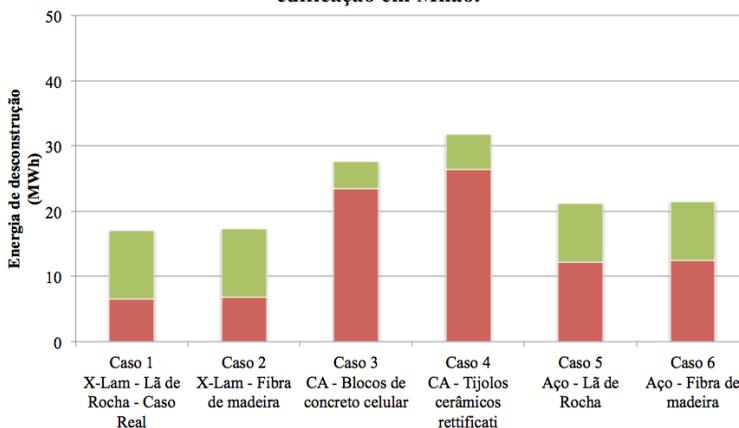
As soluções em concreto armado apresentaram a menor variação, enquanto que nos casos 5 e 6 as diferentes distâncias de transporte assim

como a diferente base de dados causou um aumento da energia de manutenção em 75%.

- *Energia de desconstrução*

A Figura 119 apresenta os resultados da energia de desconstrução da edificação com as diferentes soluções de projeto.

Figura 119– Energia de desconstrução nos seis estudos de casos da edificação em Milão.



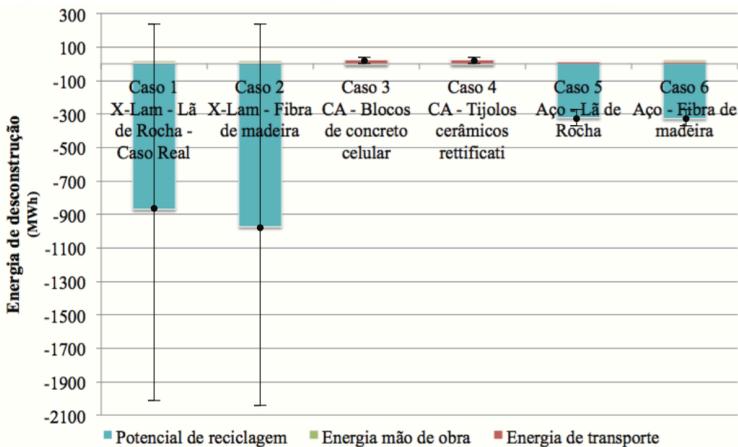
O caso real, com estrutura da edificação em X-Lam e isolamento térmico com lã de rocha, obteve a menor energia de desconstrução equivalente a 17 MWh, enquanto que o caso 4 da edificação, com estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati*, obteve a maior energia de desconstrução equivalente a 31,7 MWh. Os resultados mostraram que as soluções de projeto onde há maior quantidade de material (soluções de projeto com estrutura em concreto armado) ocorre aumento da energia de desconstrução. Isso se deve principalmente ao consumo maior para o transporte do material demolido até o aterro sanitário. Além disso, o uso de tecnologias e materiais convencionais na edificação, permitiram reduzir os tempos de desconstrução diminuindo a energia gasta pela mão de obra.

- *Energia de reuso*

A Figura 120 apresenta a energia de reuso das soluções de projeto utilizadas nos diferentes casos. Os resultados apresentados mostraram

que o reuso dos materiais da construção civil foram um fator importante para redução do consumo de energia na ACVE. Os casos com estrutura em X-Lam apresentaram melhor desempenho com potencial de reciclagem superior a 1900 MWh, enquanto que as soluções de projeto em concreto armado apresentaram o menor potencial de reuso. Este resultados mostraram que, como observado em recentes pesquisas (THORMARK, 2006; BLENGINI, 2008; CUELLAR-FRANCA, 2012), o reuso dos materiais é a melhor solução para reduzir os impactos ambientais. Como para outras fases da ACVE, o uso de diferentes bases de dados pode modificar o resultado da energia de reuso das seis soluções de projeto.

Figura 120 – Potencial de reciclagem nos seis casos da edificação em Milão.



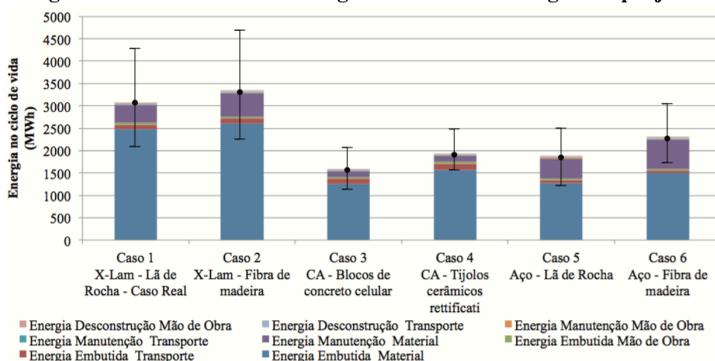
- Ciclo de vida energético das estratégias de projeto

Avaliadas todas as fases do ciclo de vida das estratégias de projeto, foi analisada a energia na ACVE das estratégias aplicadas na edificação.

A Figura 121 apresenta o ciclo de vida energético das seis soluções de projeto avaliadas na edificação estudo de caso. Os resultados mostraram que a melhor solução de projeto foi o caso 3, ou seja com estrutura em concreto armado e blocos de concreto celular. Por outro lado, o caso 2, com estrutura em X-Lam e fibra de madeira, obteve o pior desempenho energético.

A fase inicial representou, em todas as soluções de projeto, a parcela maior com até 91% da energia total no caso 4. A fase de manutenção foi também uma etapa relevante no ciclo de vida energético das estratégias, chegando a representar 30% da energia final no caso 5. Em todas as soluções de projeto a fase de demolição representou menos de 2% da energia gasta no ciclo de vida.

Figura 121 – Ciclo de vida energético das seis estratégias de projeto.



- **Parâmetro das emissões de CO₂ equivalente**

A seguir são apresentados os resultados das emissões de CO₂ equivalente das estratégias de projeto aplicadas na edificação italiana.

- Emissões na fase inicial

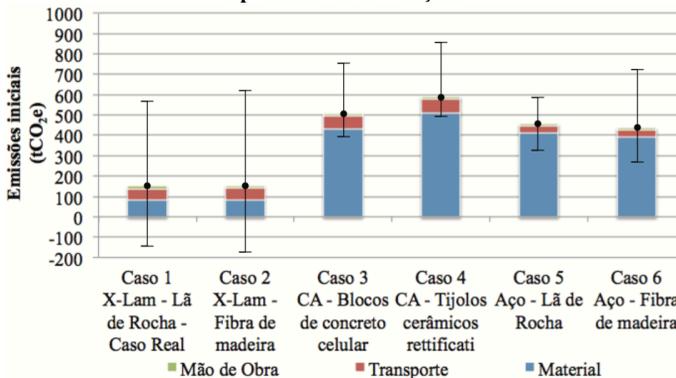
A primeira etapa da análise das emissões de CO₂e no ciclo de vida, nos seis estudos de caso da edificação, foram as emissões geradas na fase inicial.

A Figura 122 apresenta as emissões de CO₂e geradas na fase inicial das seis soluções de projeto. A solução de projeto que obteve o melhor desempenho foi o caso real da edificação (caso 1) com estrutura em X-Lam e lã de rocha, com 150 tCO₂e. O caso 4, com estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati*, obteve o pior desempenho com 591 tCO₂e. Percebeu-se que as soluções de projeto em concreto armado apresentaram valores de emissões maiores em comparação com os demais casos. O transporte das estratégias de projeto foi um fator importante na geração de CO₂e na fase inicial, chegando a representar 39% das emissões geradas na fase inicial das

soluções de projeto em estrutura em X-Lam, enquanto nas estruturas em aço representou apenas 9%. As emissões geradas pelo transporte da mão de obra apresentaram uma parcela pequena de 2% nos cenários com estrutura em concreto armado e em aço e de 7% na edificação com estrutura em X-Lam.

A variabilidade dos resultados foi uma componente importante na avaliação da fase inicial das emissões de CO₂e. As diferentes bases de dados utilizadas assim como a distância de transporte das estratégias de projeto pode causar uma variação do resultado final em até 300% em comparação com o valor médio. As soluções de projeto que apresentaram a maior variabilidade foram os casos com estrutura em X-Lam, devido a grande diferença na base de dados utilizadas.

Figura 122 – Emissões de CO₂e na fase inicial das seis estratégias de projeto aplicadas na edificação.

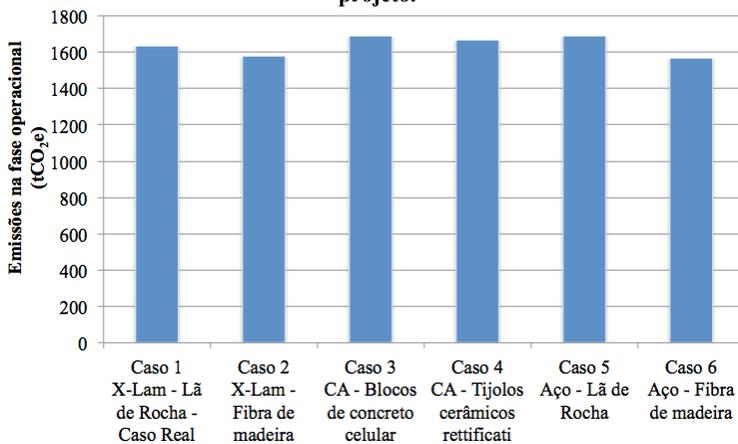


- Emissões na fase operacional

Durante a fase operacional, para manter em condições de conforto térmico do usuário na edificação é gerada uma grande quantidade de CO₂e. A Figura 123 apresenta as emissões de CO₂e geradas na fase operacional das seis soluções de projeto.

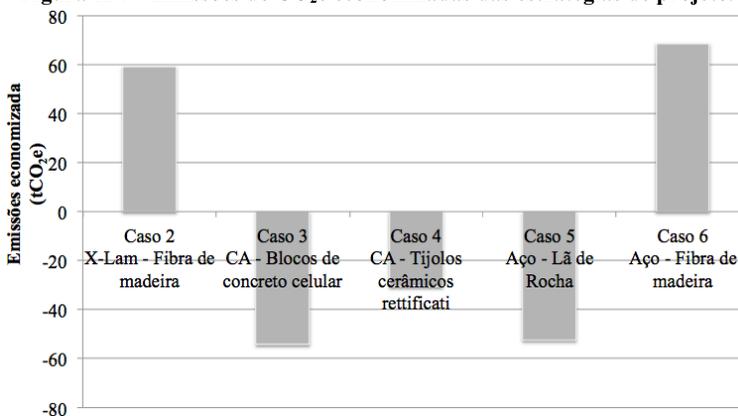
Como observado na energia operacional, entre as diferentes soluções de projeto não existiu uma grande diferença. O caso 2, com estrutura em X-Lam e fibra de madeira, obteve o melhor desempenho, com 1576 tCO₂e geradas. Por outro lado, o caso 3, estrutura em concreto armado com blocos celulares na envoltória, obteve o pior desempenho com 1689 tCO₂e geradas.

Figura 123 – Emissões de CO₂e na fase operacional das estratégias de projeto.



A Figura 124 apresenta as emissões de CO₂e economizadas em comparação com o caso real (caso 1).

Figura 124 – Emissões de CO₂e economizadas das estratégias de projeto.

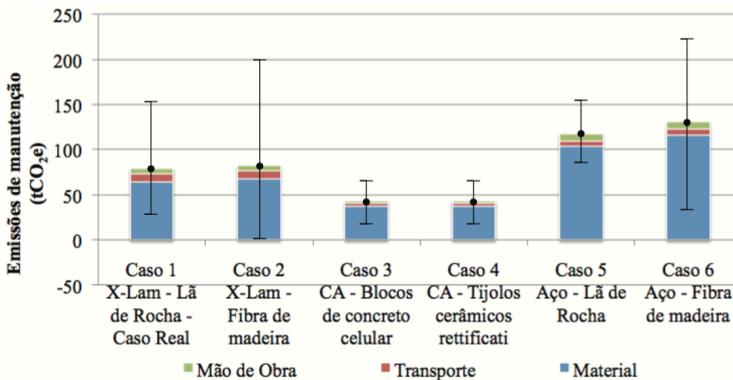


Entre as cinco soluções de projeto, somente o caso 2 e o caso 6 permitiram reduzir as emissões de CO₂e em comparação com o caso real. Os outros três casos apresentaram maiores emissões na fase operacional.

- Emissões na fase de manutenção

Após a avaliação da fase operacional nas emissões de CO₂e foram analisados os resultados de manutenção. A Figura 125 apresenta as emissões de CO₂e geradas na fase de manutenção das seis soluções de projeto. Nas emissões de CO₂e de manutenção os casos em concreto armado obtiveram o melhor desempenho com 43 tCO₂e. O caso 6, estrutura em aço e isolamento em fibra de madeira, obteve o pior desempenho com 131 tCO₂e. Isso deveu-se a uma menor manutenção das estratégias em concreto armado em comparação com as outras soluções de projeto. O transporte das estratégias substituídas representou 11% das emissões geradas nos casos com estrutura em X-Lam enquanto nas soluções de projeto em aço representou 5%. As emissões geradas pela mão de obra, representaram aproximadamente 7% das emissões de manutenção nas diversas soluções de projeto avaliadas. A variação dos resultados de manutenção foi mais evidente nas soluções de projeto onde a quantidade de estratégias substituídas foi maior e de forma particular na substituição da fibra de madeira pois apresenta uma grande variabilidade entre as diferentes bases de dados utilizadas.

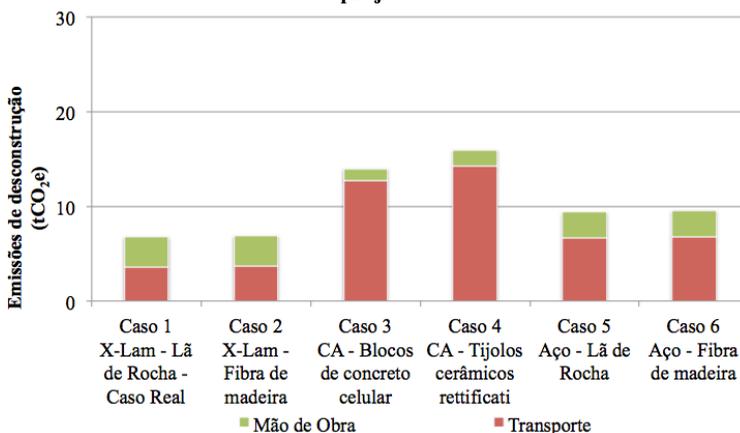
Figura 125 – Emissões de CO₂e na fase de manutenção das estratégias de projeto aplicadas na edificação.



- Emissões na fase de desconstrução

A última fase do ciclo de vida na ACVCO₂ foi de desconstrução. A Figura 126 apresenta os resultados das emissões de CO₂e geradas para o transporte da mão de obra e das estratégias de projeto até o aterro sanitário.

Figura 126 – Emissões de CO₂e na fase de desconstrução das estratégias de projeto.



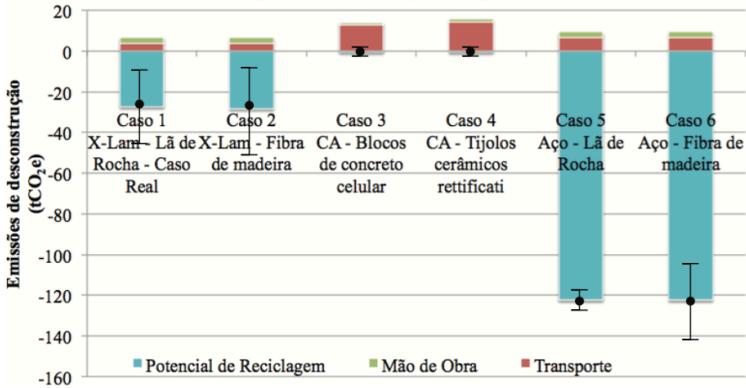
A solução de projeto com as menores emissões de CO₂e na fase de desconstrução foi o caso 2, com 7 tCO₂e, enquanto o caso 4 obteve o pior desempenho com 16 tCO₂e. Nas soluções de projeto onde a quantidade de material transportado até o aterro sanitário foi maior, as emissões geradas na fase de desconstrução resultaram elevadas. As emissões de CO₂e geradas pela mão de obra chegaram a representar 50% do total.

- Emissões na fase de reuso

Como na ACVE também na avaliação das emissões de CO₂ equivalente são apresentados, a título informativo, os resultados das emissões economizadas através da fase de reuso. A Figura 127 apresenta os resultados das emissões de CO₂e na fase de desconstrução com o potencial de reciclagem das diferentes soluções de projeto.

Através do reuso dos materiais presentes nas estratégias de projeto reduziu-se as emissões de dióxido de carbono em até 122 tCO₂e (no caso 6). As soluções de projeto em X-Lam e aço apresentaram maior potencial de reciclagem, o que permitiu reduzir os impactos finais das estratégias de projeto. Estes resultados, mesmo não fazendo parte da avaliação final no ciclo de vida, apresentam dados interessantes que podem ser considerados na escolha das estratégias já nas primeiras fases de projeto.

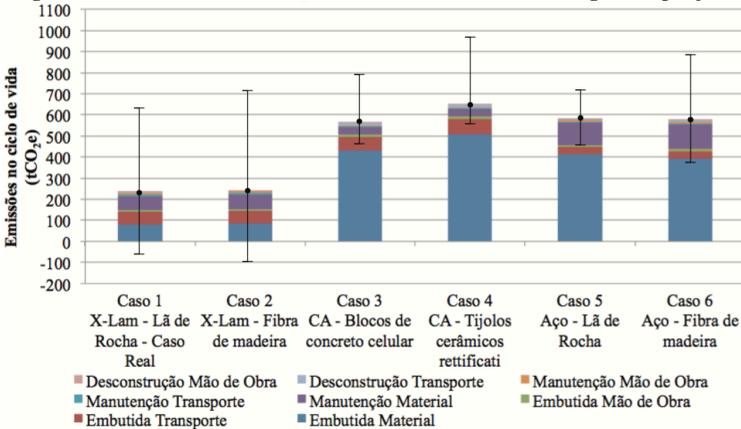
Figura 127 – Emissões de CO₂e na fase de desconstrução com o potencial de reciclagem das estratégias de projeto.



- Ciclo de vida das emissões de CO₂ das estratégias de projeto

A Figura 128 apresenta o ciclo de vida das emissões de CO₂e das seis soluções de projeto avaliadas na edificação estudo de caso.

Figura 128 – Emissões de CO₂e no ciclo de vida das estratégias de projeto.



Os resultados mostraram que a melhor solução de projeto foi o caso real (caso 1), ou seja com estrutura em X-Lam e lã de rocha, com 236 tCO₂e, enquanto o caso 4, com estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati*, obteve o pior desempenho, com 651 tCO₂e.

A fase de manutenção chegou a representar 34% das emissões no ciclo de vida na edificação com estrutura em X-Lam, entre 20% e 23% nas soluções de projeto em aço e apenas 8% nas soluções em concreto armado. A fase de desconstrução apresentou uma parcela pequena, com uma emissão gerada no ciclo de vida em torno de 3%. As soluções de projeto em X-Lam apresentaram a maior variação nos resultados finais. No caso 2 as emissões de CO₂e variaram em até 236%.

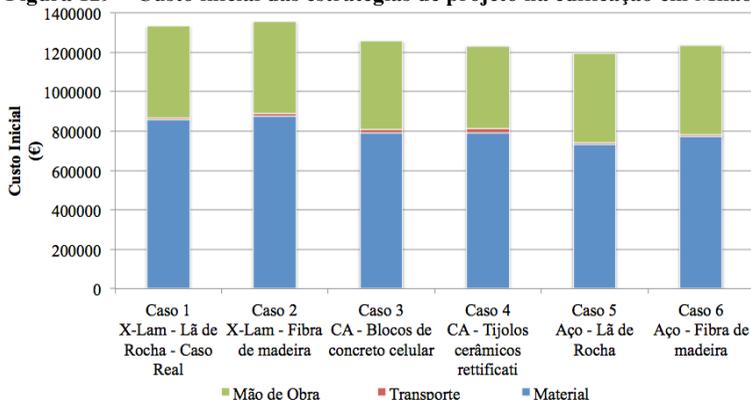
- **Parâmetro de custo**

O último parâmetro avaliado foi o econômico financeiro através da ACCV. Para a avaliação das diferentes estratégias da edificação localizada na cidade de Milão foram utilizados os dados da *Camera di Commercio di Milano* (2016). Nesta fase foi utilizada unicamente a distância intermediária (250 km) na avaliação dos custos de transporte.

- **Custo inicial**

A Figura 129 apresenta os custos iniciais das soluções de projeto aplicadas na edificação na cidade de Milão.

Figura 129 – Custo inicial das estratégias de projeto na edificação em Milão.



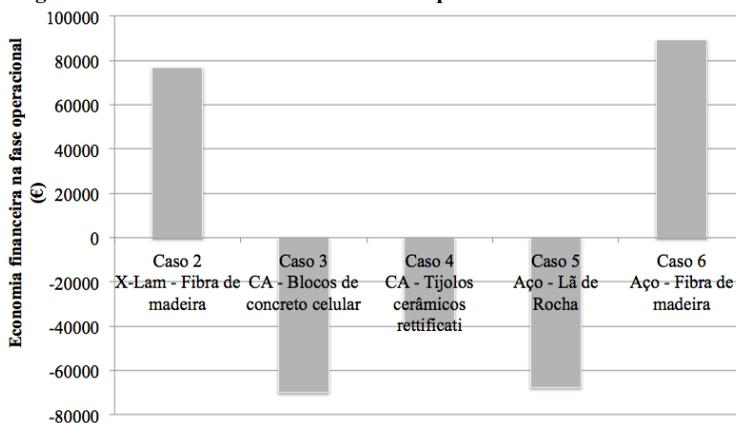
A solução de projeto com menor custo foi o caso 5, com estrutura em aço e isolamento térmico com lã de rocha, com um custo inferior a € 1.200.000,00, enquanto o caso 2, com estrutura em X-Lam e fibra de madeira, obteve o maior custo de € 1.354.000,00. A diferença entre as seis soluções de projeto, na fase inicial, chegou no máximo a

€ 150.000,00. O fator que mais incidiu no custo inicial foi o custo das soluções de projeto, seguido pela mão de obra que variou entre 35% e 38%. O custo de transporte representou menos de 2% do custo inicial. Os resultados obtidos foram semelhantes ao valor da *Camera di Commercio di Milano* (2016) que estima o custo da mão de obra em 40%.

- Custo Operacional

A Figura 130 apresenta os resultados da economia na conta de luz nos 100 anos de vida da edificação.

Figura 130– Economia financeira na fase operacional na cidade de Milão.



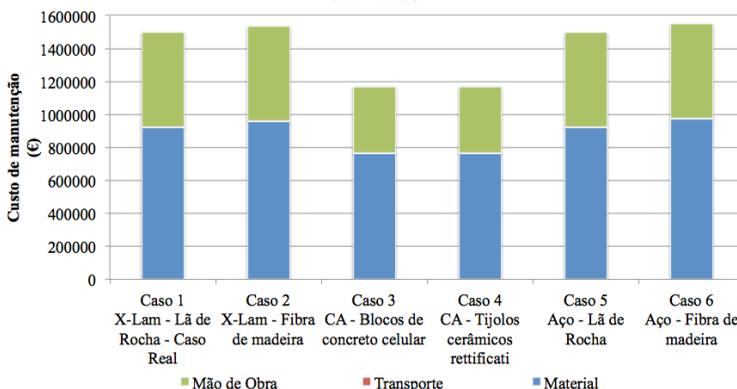
Os resultados mostraram que somente duas soluções de projeto permitiram reduzir os custos na fase operacional em comparação com o caso 1. Os casos 2 e 7, permitiram economizar € 76.800,00 e € 89.400,00, respectivamente. As outras soluções de projeto obtiveram resultado negativo, sendo o caso 3 a pior solução, com aumento dos custos de € 69.800,00.

- Custo de Manutenção

Após a avaliação do custo operacional, as soluções de projeto foram avaliadas no custo de manutenção na vida útil da edificação.

A Figura 131 apresenta os custo de manutenção das estratégias de projeto na edificação em Milão.

Figura 131 – Custo de manutenção das estratégias de projeto na edificação em Milão.

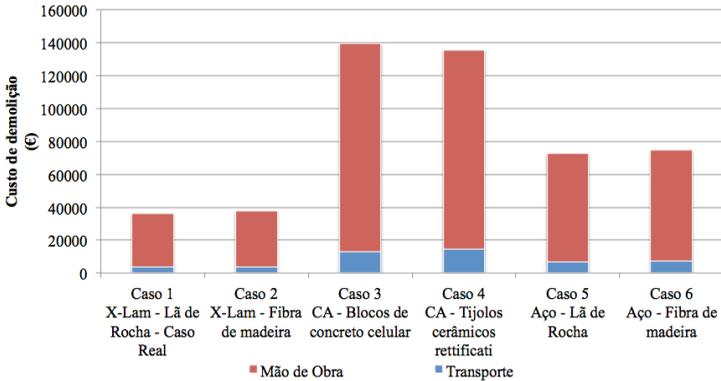


Os resultados mostraram que os custos de manutenção superaram os custos iniciais, mesmo a substituição sendo realizada parcialmente (pois nem todas as estratégias exigem substituição, como as estruturas portantes). Isso deveu-se ao reajuste dos preços das estratégias devido à inflação do índice dos Preços ao Consumidor Amplo (ISTAT, 2017), que mesmo sendo de 1,34% ao ano, implicará em um aumento dos preços no futuro. As soluções de projeto com o menor custo de manutenção foram os casos 3 e 4, com estrutura em concreto armado, com € 1.168.000,00, enquanto o caso 6, com estrutura em aço e fibra de madeira, obteve o maior custo de € 1.550.000,00. Na fase de manutenção o custo dos materiais das estratégias representou mais de 60% em todos os casos, seguido pelo custo da mão de obra. O custo de transporte teve pouca influência no custo de manutenção.

- Custo de desconstrução

A última fase avaliada foi o custo de desconstrução. A Figura 132 apresenta o custo de desconstrução nos seis casos aplicados na edificação. A solução de projeto com o maior custo de demolição foi o caso 3 (€ 140.000,00), estrutura em concreto armado e blocos de concreto celular, enquanto o caso 1, com estrutura em X-Lam e lã de rocha, obteve o menor custo (€ 36.380,00). A mão de obra representou 90% do custo de desconstrução nas seis soluções de projeto. No parâmetro de custo não foi avaliado o custo de reuso, pois não são disponíveis na literatura e no mercado dados úteis para sua avaliação.

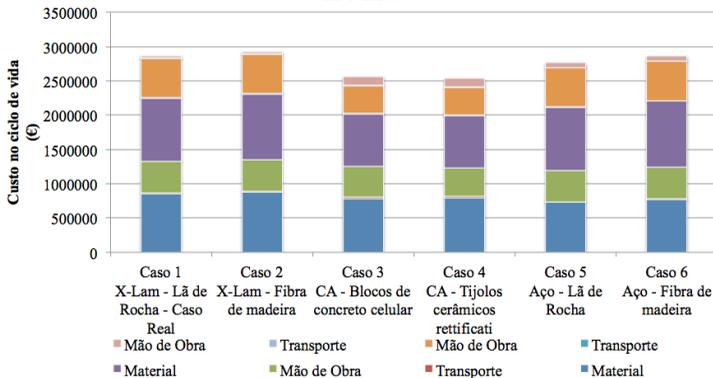
Figura 132 – Custo de desconstrução das estratégias de projeto na edificação em Milão.



- Ciclo de vida de custo

A Figura 133 apresenta os custos das seis soluções de projeto no ciclo de vida da edificação. O caso 2, estrutura em aço e isolamento em fibra de madeira, foi a solução com custo maior (€ 2.927.500,00), enquanto o caso 4, com estrutura em concreto armado e tijolos cerâmicos *rettificati*, obteve o menor custo (€ 2.535.000,00). A fase inicial representou entre 43% e 49% do custo final, enquanto a fase de manutenção entre 46% e 54%. A fase de desconstrução foi a que menos incidiu no custo final, entre 1% e 5%.

Figura 133 – Custo no ciclo de vida das estratégias de projeto na edificação em Milão.

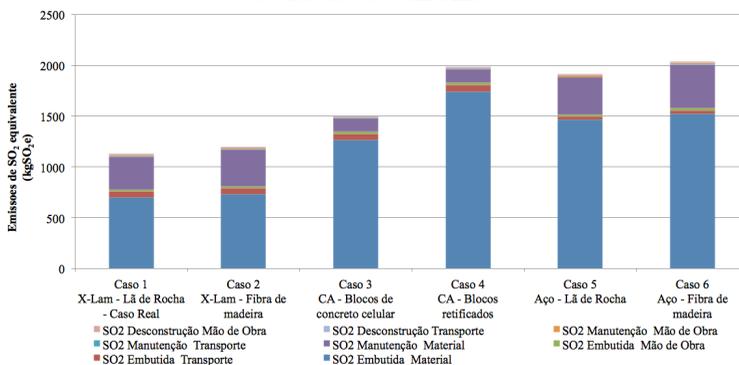


APÊNDICE F – Avaliação de categoria de impacto do potencial de acidificação no estudo de caso italiano

A escolha das categorias de impacto ambiental na análise do ciclo de vida é uma das problemáticas mais recorrentes nas pesquisas sobre ACV (KYLILI et al., 2017; CABEZA et al., 2014; SILVA, 2003; TABORIANSKI; PRADO, 2001). A avaliação de apenas dois indicadores de impacto pode não ser suficiente para a escolha das melhores soluções de projeto. Por esta razão decidiu-se, a título informativo, avaliar as seis estratégias de projeto através de outro indicador de impacto ambiental. A escolha foi baseada na análise da literatura internacional que identifica entre as categorias de impacto mais utilizadas, após o potencial de aquecimento global, o potencial de acidificação (ARDENTE et al., 2011; AKTAS; MILEK, 2012; STAZI et al., 2012; COLLINGE et al., 2013; LEWANDOWSKA et al., 2015; BUENO et al., 2016; POMBO et al., 2016; ASSEFA; AMBLER, 2017).

A Figura 134 apresenta os resultados na categoria de impacto do potencial de acidificação das seis soluções de projeto no estudo de caso em Milão.

Figura 134– Potencial de acidificação nas seis estratégias de projeto no estudo de caso em Milão.

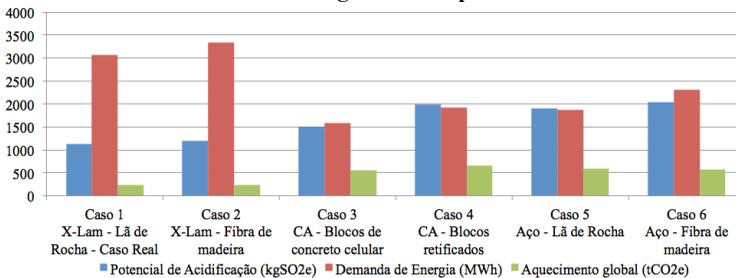


A solução de projeto com a menor quantidade de emissões de SO₂ equivalente no ambiente foi o caso 1 ou seja o caso real da edificação com estrutura em X-Lam e isolamento térmico em lã de rocha, enquanto o caso 6, com estrutura em aço e isolamento em fibra de madeira, obteve o pior resultado. Percebeu-se que os casos da edificação

em estrutura portante em X-Lam obtiveram o melhor desempenho enquanto as duas soluções da edificação em aço provocaram o maior impacto potencial de acidificação no ambiente, superior em até 88%, em comparação com a melhor solução. Entre as duas soluções de projeto com estrutura em concreto armado, o caso 3 com paredes externas em blocos de concreto celular, obteve o melhor desempenho reduzindo em 33% o potencial de acidificação em comparação com o caso 4, em tijolos cerâmicos *rettificati*. Este resultado demonstrou que o material cerâmico tem um impacto potencial de acidificação maior em comparação com o material concreto. Nas diferentes soluções de projeto a SO₂ embutida nos materiais representou a parcela maior no ciclo de vida, seguida pela manutenção do material e do transporte na fase inicial. No caso 4 a quantidade de SO₂ emitida na fase inicial representou 88% da emissão total, enquanto no caso 2 a fase de manutenção representou 30% da SO₂ total. A fase de desconstrução representou menos de 1% do potencial de acidificação final nas diferentes soluções de projeto.

Comparando os resultados do potencial de acidificação com as outras duas categorias de impacto ambiental avaliadas precedentemente, percebe-se que as soluções de projeto obtiveram desempenhos diferentes nas diversas categorias (Figura 135).

Figura 135 – Desempenho das estratégias de projeto na edificação em Milão nas três categorias de impacto ambientais.



Assim, as soluções de projeto em X-Lam, que obtiveram o melhor desempenho no potencial de acidificação, apresentaram pior resultado na demanda de energia enquanto nas emissões de CO₂ resultaram ser a melhor escolha projetual. Da mesma forma, as outras soluções de projeto apresentaram resultados contrastantes entre as diferentes categorias de impacto avaliadas. Os resultados obtidos mostraram que através da avaliação de diferentes categorias de impacto

ambientais na ACV é possível obter uma análise mais completa das estratégias de projeto e ao mesmo tempo permite identificar em qual categoria as soluções projetuais resultam ser mais impactantes. Por outro lado, a escolha da melhor solução de projeto se mostrou ainda mais complexa, pois o desempenho das estratégias de projeto resultou diferente nas três categorias de impacto. Neste caso, a aplicação do método de tomada de decisão multicritério se comprova como instrumento ainda mais eficaz para a escolha final da melhor solução de projeto.