

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ANÁLISE AMBIENTAL DE ALVENARIAS EM BLOCOS:
UMA DISCUSSÃO BASEADA NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
E NO DESEMPENHO TÉRMICO DE ENVOLTÓRIAS**

Júlia Hallack Sansão

Belo Horizonte

2011

**ANÁLISE AMBIENTAL DE ALVENARIAS EM BLOCOS:
UMA DISCUSSÃO BASEADA NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
E NO DESEMPENHO TÉRMICO DE ENVOLTÓRIAS**

Júlia Hallack Sansão

Júlia Hallack Sansão

**ANÁLISE AMBIENTAL DE ALVENARIAS EM BLOCOS:
UMA DISCUSSÃO BASEADA NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
E NO DESEMPENHO TÉRMICO DE ENVOLTÓRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Gestão de Empreendimentos em
Construção Civil (Sustentabilidade)

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguiar

Co-Orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

ANÁLISE AMBIENTAL DE ALVENARIAS EM BLOCOS:
UMA DISCUSSÃO BASEADA NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
E NO DESEMPENHO TÉRMICO DE ENVOLTÓRIAS

Júlia Hallack Sansão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Comissão Examinadora

Profª Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar
DEMC/UFMG (Orientadora)

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
DEMC/UFMG

Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães
DEMC /UFMG

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques
CEFET-MG

Belo Horizonte, 20 de junho de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

***Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu irmão e ao Celmar
por compartilharem o sonho e se orgulharem da vitória.***

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Suraia Hallack Sansão, pelo seu amor incondicional, por ter sido minha incentivadora constante, pela sua confiança na minha capacidade, pela sua cumplicidade e pelas orações durante as longas e muitas viagens.

Ao meu pai, Raphael Sansão Filho, meu verdadeiro mestre, por compartilhar meus sonhos e me encorajar a enfrentar o mundo técnico dos engenheiros com toda a expressividade artística de um arquiteto.

Ao meu irmão, João Pedro Hallack Sansão, pela companhia agradável e assistência carinhosa durante minha permanência em Belo Horizonte, além do grande auxílio na execução dos cálculos necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu grande amor, amigo e companheiro, Celmar Simões, pela incondicional e fundamental ajuda demonstrada para a realização dos meus sonhos, por sempre oferecer seu ombro nos não poucos momentos de insegurança e estender aquele abraço gostoso com um lindo sorriso para compartilharmos as vitórias.

À toda a minha família e à do Celmar pelo carinho e compreensão dos momentos ausentes.

À grande amiga Ana Cecília por não ter poupado esforços para me auxiliar na compreensão dos resultados e pela sua generosidade na vida acadêmica e profissional que espero um dia poder retribuir.

À prima-irmã Michelle e as minhas queridas amigas Ana Clara, Bárbara O., Bárbara V., Elisa, Isabela, Larissa, Thaïs e Fabiana pelas conversas agradáveis, força, alegria e torcida.

À Léa e à Adriana pelo apoio e amizade que tanto contribuíram para a minha saúde física e meu equilíbrio mental durante esses dois anos de dedicação.

Às novas amigas e estudantes de engenharia Nathália e Thais pela ajuda no recolhimento de dados necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Luiz Carlos Cabral pela impressão gráfica fiel à proposta do trabalho realizada com tanta competência e, principalmente, por ter me presenteado com o cd Sonho'70 de Egberto Gismonti com músicas que reabasteceram minhas energias.

À Professora Maria Teresa Paulino Aguilar pelo seu notável exemplo de pesquisadora competente, orientadora generosa e engenheira sensível. Ainda a agradeço por lançar um grande desafio e por acreditar que eu seria capaz de superá-lo.

Aos Professores Dr. Adriano de Paula e Silva, Dr. Aldo Giuntini de Magalhães e Dr. Guilherme Fernandes Marques pelas valiosas contribuições para a melhoria deste texto.

À Professora Grace Cristina Roel Gutierrez do Laboratório de Conforto Ambiental (LABCON - UFMG) pela a atenção e pelos ensinamentos que contribuíram para que o trabalho ficasse muito mais interessante e completo.

Ao Professor Maurílio Nunes Vieira por ter me acolhido no Laboratório de Voz do Departamento de Física/ICEX-UFMG.

Às fábricas: Tijolos Jacarandá, Cerâmica GGP e Blocos Sigma personificadas nas figuras de Rafaella, André e Lúcio, respectivamente, pela contribuição para a pesquisa através do fornecimento de dados sobre a fabricação e características de seus produtos.

Aos meus colegas do curso pelo companheirismo e troca de experiência ao longo deste período.

Aos funcionários do DEMC, em especial, Ivonete, Marina e Cláudio, pelo apoio oferecido.

À Capes pelo apoio financeiro.

A Deus por sempre intervir de maneira surpreendente para que eu siga caminhos enriquecedores e menos óbvios, dando-me força e saúde para unir, de maneira equilibrada, a arte e a técnica da arquitetura e da engenharia.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que contribuíram de forma positiva para a realização desse sonho e também aqueles que de alguma forma criaram dificuldades tornando a conquista ainda mais importante. Muito obrigada!

“ Deus quer, o homem sonha, a obra nasce. ”

Fernando Pessoa

RESUMO

A seleção de materiais de construção que minimizem o impacto ambiental é uma das estratégias que contribuem para a eco-eficiência da edificação. A análise do ciclo de vida (ACV) se destaca como um método que auxilia na escolha de produtos sob uma perspectiva ambiental. Tal ferramenta permite a mensuração e avaliação dos impactos ambientais dos produtos dentro de limites pré-determinados e de acordo com a unidade funcional. Frequentemente, nos estudos de materiais de construção utilizando ACV, são analisados produtos exclusivamente pela função principal a que se destinam (estrutura, vedação, cobertura). No entanto, a análise ambiental isolada de um material de construção ou de um sistema construtivo pode acarretar em conclusões equivocadas por limitar-se a inventariar e avaliar somente as etapas primárias do ciclo (aquisição de recursos, fabricação e transporte), desconsiderando o comportamento dos mesmos na etapa referente ao uso. Uma das formas de se ponderar esse aspecto é considerar como unidade funcional de um estudo de ACV, não somente a função do material que constitui a envoltória e sim de um sistema de vedação que proporcione um conforto térmico pré-determinado. Diante deste cenário, este trabalho se propõe a fazer uma análise ambiental de envoltórias, para uma tipologia unifamiliar, composta por painéis de blocos de concreto ou cerâmicos, com desempenhos térmicos similares. Para alcançar este objetivo, foi realizada uma avaliação do desempenho térmico das paredes externas da tipologia de referência e para a determinação de envoltórias com comportamentos térmicos similares, considerou-se, neste trabalho, que a resistência térmica seria suficiente para descrever o desempenho térmico. Para a compreensão do impacto ambiental utilizou-se o *software* de análise do ciclo de vida SimaPro 7.1.8. No caso da análise em que se desconsidera o desempenho térmico dos painéis, os resultados indicam que os ciclos de vida de envoltórias executadas com blocos cerâmicos acarretam maiores danos ambientais nas etapas primárias quando comparadas as mesmas fases dos ciclos das envoltórias em blocos de concreto. Todavia, considerando-se a etapa de uso na avaliação do impacto das envoltórias, as habitações com vedações em blocos de concreto, poderiam demandar maior consumo de energia caso os usuários solicitem equipamentos de refrigeração e aquecimento do ar para obterem mais conforto térmico. As simulações realizadas comparando os ciclos de vida de envoltórias compostas por blocos de naturezas distintas e que apresentam desempenhos térmicos similares, indicam que os painéis em blocos de concreto sempre impactam mais o meio ambiente em todos os grupos de danos: à saúde humana, ao ecossistema e aos recursos.

Palavras chaves: Construção Civil, Envoltórias, Avaliação do Ciclo de Vida, Conforto Térmico.

ABSTRACT

Selecting construction materials that minimize environmental impact is a strategy that contributes to the eco-efficiency of a building. The life cycle analysis (LCA) stands out as a method that aids the choice of products from an environmental perspective. This tool allows the measurement and evaluation of products' environmental impacts within predetermined limits and according to the functional unit. Frequently, in studies of construction materials by means of LCA, products are analyzed exclusively by the main function intended (structure, building envelope, roof). However, the environmental analysis of a single material or construction in a building system may lead to erroneous conclusions by limiting to inventory and evaluate only the primary stages of the cycle (resource acquisition, manufacturing and transportation), disregarding their behavior in operation stage. One way to examine this aspect is to consider as a functional unit of LCA study, not only the material but a building envelope that provides a predetermined thermal comfort. Given this scenario, this work proposes an environmental analysis of envelopes for a single family house, composed of concrete blocks or ceramic brick walls, with similar thermal performances. To achieve this goal, an evaluation of thermal performance of external walls of the reference house was carried out, and for the determination of envelopes with similar thermal behaviors it is considered that the thermal resistance would be sufficient to describe the thermal performance. The LCA software package SimaPro 7.1.8 was used to understand the environmental impact. For the analysis disregarding the thermal performance of the walls, the results indicate that the life cycles of the envelopes carried out with ceramic blocks cause more environmental damage in the primary stages compared to the same phases of the cycles of the envelopes in concrete blocks. However when considering the operation stage in envelope impact evaluation, concrete houses would require increased energy consumption if the users requested refrigeration or heating to achieve better thermal comfort. Simulations comparing the life cycles of envelopes composed by blocks of different natures and similar thermal performances indicate that the concrete block walls have greater impact to the environment in all groups of damage: human health, ecosystem and resources.

Keywords: Building Materials, Life Cycle Analysis, Thermal Comfort

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS.....	18
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	19
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVO.....	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1. Análise Ambiental do Ambiente Construído.....	24
3.2. Desempenho Térmico de Edificações.....	26
3.2.1. Conforto Térmico.....	28
3.2.1.1. Indicadores de Conforto Térmico.....	29
3.2.2. Bioclimatologia	30
3.2.2.1. Estratégias Bioclimáticas.....	31
3.2.3. Métodos de avaliação de Desempenho Térmico	37
3.3. Avaliação do Ciclo de Vida	39
3.3.1. Normas	42
3.3.2. Etapas	43
3.3.2.1. Definição do Objetivo e do Escopo.....	44
3.3.2.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	44
3.3.2.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	45
3.3.2.4. Interpretação.....	48
3.3.3. Elementos Fundamentais da ACV	48
3.3.3.1. Unidade Funcional.....	48
3.3.3.2. Fronteiras do Sistema.....	48

3.3.3.3.	Alocação.....	49
3.3.4.	Aplicações da ACV	50
3.3.4.1.	Aplicações na Construção Civil.....	51
3.3.5.	Ferramentas para a Análise do Ciclo de Vida.....	53
3.3.5.1.	Bancos de Dados e Métodos.....	54
3.3.5.2.	Softwares.....	57
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1.	Definição da Tipologia de Referência e Sistemas de Vedação.....	62
4.2.	Determinação da Zona de Conforto	63
4.3.	Escolha da Estratégia de Condicionamento Térmico Passivo.....	63
4.4.	Caracterização dos Materiais	64
4.5.	Avaliação do Desempenho Térmico das Envoltórias	65
4.5.1.	Avaliação por Prescrição.....	65
4.5.2.	Avaliação por Desempenho	70
4.6.	Levantamento de Dados.....	72
4.7.	Análise do Ciclo de Vida das Envoltórias	72
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1.	Caracterização dos Materiais	74
5.2.	Determinação da Zona de Conforto e Estratégias Bioclimáticas.....	76
5.3.	Avaliação do Desempenho Térmico das Envoltórias	78
5.3.1.	Avaliação por prescrição	78
5.3.2.	Avaliação por desempenho.....	81
5.4.	Levantamento do Material.....	85
5.5.	Análise do Ciclo de Vida.....	86

5.5.1.	Definição do Objetivo e do escopo	86
5.5.2.	Inventário	88
5.5.3.	Avaliação de Impacto	95
5.5.4.	Interpretação.....	107
6.	CONCLUSÕES.....	108
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Carta Bioclimática de Givoni adotada para o Brasil (ANALYSIS BIO 2.1.5, 2011) ..	32
Figura 3.2	Zona de Conforto (LAMBERTS <i>et al.</i> , 1997)	33
Figura 3.3	Zona de ventilação (LAMBERTS <i>et al.</i> , 1997)	33
Figura 3.4	Zona de de resfriamento evaporativo e umidificação (LAMBERTS <i>et al.</i> , 1997)	34
Figura 3.5	Zonas de massa térmica de refrigeração e para aquecimento (LAMBERTS <i>et al.</i> , 1997)	35
Figura 3.6	Estratégias de resfriamento e para aquecimento (LAMBERTS <i>et al.</i> , 1997)	35
Figura 3.7	Zona de aquecimento solar (LAMBERTS <i>et al.</i> , 1997)	36
Figura 3.8	Carta bioclimática adaptada e suas estratégias de condicionamento térmico (RORIZ <i>et al.</i> , 1999)	37
Figura 3.9	Análise do Ciclo de Vida (MATERIO DESIGN, 2009)	40
Figura 3.10	Etapas do Ciclo de Vida (adaptado de CIRAIG, 2009)	41
Figura 3.11	Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida (NBR ISO 14040, 2009)	43
Figura 3.12	Análise de inventário do ciclo de vida (SOARES, 2009)	45
Figura 3.13	Elementos Obrigatórios da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (SOARES, 2009)	46
Figura 3.14	Elementos Opcionais da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (SOARES, 2009)	47
Figura 3.15	Relação entre os mecanismos ambientais, categorias de impactos e indicadores ambientais (SILVA, 2005)	49
Figura 3.16	Níveis de sistemas do ciclo de vida de um edifício como produto (PAULSEN, 2001 <i>apud</i> LIBRELOTTO, 2006)	52
Figura 3.17	Ciclo de Vida de uma Edificação (TAVARES <i>et al.</i> , 2005)	53
Figura 3.18	Representação da metodologia do Eco-indicator 99 (SILVA, 2005)	56
Figura 3.19	Exemplo de rede de processo gerada pelo <i>software</i> Simapro	60
Figura 3.20	Exemplo de gráfico gerado pelo <i>software</i> Simapro	60
Figura 4.1	Etapas do Trabalho	61
Figura 4.2	Perspectiva e Planta Baixa Projeto Padrão Caixa (CADERNOS CAIXA, 2007)	62
Figura 4.3	Recomendações para Zona Bioclimática 3 (ZBBR, 2004)	63
Figura 4.4	Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas (NBR15220, 2005)	67

Figura 4.5	Implantação Projeto Padrão Caixa (CADERNOS CAIXA, 2007)	71
Figura 5.1	Dimensões consideradas do bloco de concreto	74
Figura 5.2	Dimensões consideradas do bloco cerâmico	75
Figura 5.3	Diagrama de Givoni para cidade de Belo Horizonte (ANALYSIS BIO 2.1.5, 2011)..	77
Figura 5.4	Diagrama adaptado de Givoni para cidade de Belo Horizonte (RORIZ, <i>et al.</i> , 1999).	78
Figura 5.5	Paredes de blocos cerâmicos e de concreto	79
Figura 5.6	Distribuição horária de TBS para o solstício de verão	82
Figura 5.7	Distribuição horária de TBS para o dia 21 de junho, solstício de inverno	82
Figura 5.8	Habitação com envoltória de blocos cerâmicos - Distribuição do fluxo térmico no solstício de verão	83
Figura 5.9	Habitação com envoltórias de blocos de concreto - Distribuição do fluxo térmico no solstício de verão	83
Figura 5.10	Habitação com envoltória de blocos cerâmicos - Distribuição do fluxo térmico no solstício de inverno	84
Figura 5.11	Habitação com vedação de blocos de concreto - Distribuição do fluxo térmico no solstício de inverno	84
Figura 5.12	Fronteiras do sistema (envoltórias em bloco de concreto)	86
Figura 5.13	Fronteiras do sistema (envoltórias em bloco de cerâmico)	87
Figura 5.14	Descrição do objetivo e escopo da pesquisa no SimaPro	87
Figura 5.15	Dados de entrada referente à fabricação de 1kg de bloco de concreto	88
Figura 5.16	Rede do processo de fabricação de 1kg de bloco de concreto	89
Figura 5.17	Dados de entrada referentes à fabricação de 1kg de bloco de cerâmico	90
Figura 5.18	Rede do processo de fabricação de 1kg de bloco de cerâmico	91
Figura 5.19	Dados de entrada referente à fabricação de 1kg de reboco	91
Figura 5.20	Rede do processo de fabricação de 1kg de bloco de reboco	92
Figura 5.21	Dados de entrada referentes à montagem de envoltória com bloco cerâmico	93
Figura 5.22	Dados de entrada referentes à montagem de envoltória com bloco de concreto	93
Figura 5.23	Ciclo de vida das envoltórias executadas com blocos de concreto	94
Figura 5.24	Ciclo de vida das envoltórias executadas com blocos de cerâmicos.....	95
Figura 5.25	Caracterização dos ciclos de vida das envoltórias considerando a unidade funcional UF1	97
Figura 5.26	Caracterização dos ciclos de vida das envoltórias considerando a unidade funcional UF2	98
Figura 5.27	Avaliações dos danos dos ciclos de vida das envoltórias considerando a unidade funcional UF1	100

Figura 5.28	Avaliações dos danos dos ciclos de vida das envoltórias considerando a unidade funcional UF2	100
Figura 5.29	Normalização dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF1	101
Figura 5.30	Normalização dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF2	101
Figura 5.31	Ponderação dos ciclos de vida das envoltórias utilizando a unidade funcional UF1.....	103
Figura 5.32	Ponderação dos ciclos de vida das envoltórias utilizando a unidade funcional UF2	103
Figura 5.33	Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF1	104
Figura 5.34	Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF2	105
Figura 5.35	Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF1	106
Figura 5.36	Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF2	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Principais bancos de dados, focos e fontes de coleta de dados (SILVA, 2005)	54
Tabela 3.2	Métodos empregados para avaliação de impactos ambientais (SILVA, 2005)	55
Tabela 4.1	Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico (NBR 15220, 2005)	64
Tabela 4.2	Transmitância Térmica, atraso térmico e fator de calor solar para cada tipo de vedação externa (NBR 15220, 2005)	65
Tabela 4.3	Resistência térmica superficial interna e externa (NBR 15220, 2005).....	66
Tabela 4.4	Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas) (NBR15220, 2005)	67
Tabela 4.5	Resistência térmica de camadas de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura (NBR15220, 2005)	68
Tabela 4.6	Dados da tipologia de referência inseridos no software Arqitrop® 3.0	72
Tabela 5.1	Propriedades dos materiais determinadas em laboratórios e dadas pela NBR15220-2 (2005)	74
Tabela 5.2	Características dos Blocos	76
Tabela 5.3	Resistência térmica dos blocos e de paredes com 2cm de reboco	79
Tabela 5.4	Transmitância térmica, atraso térmico e fator de ganho solar para as paredes	80
Tabela 5.5	Espessura do reboco em ambas as faces para paredes de blocos de concreto de 19cm com resistência térmica pré-estabelecida	81
Tabela 5.6	Quantitativo de materiais	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACCV	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BNH	Banco Nacional de Habitação
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CEF	Caixa Econômica Federal
CIB	International Council for Research and Innovation In Building and Construction
GBC	Green Building Council
IDHEA	Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LCA	Life Cycle Analysis
LCC	Life Cycle Cost
LCM	Life Cycle Manager
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LABCON	Laboratório de Conforto ambiental e Eficiência Energética em Edificações
LIME	Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling
NBR	Norma Brasileira Registrada
NO _x	Oxido de Nitrogênio
ONU	Organização das Nações Unidas
RCD	Resíduos de construção e demolição
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts)
TRY	Test Reference Year

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é considerado um dos setores que mais impacta o meio ambiente, tanto na fase de produção quanto na etapa de uso da edificação. A nível mundial, a indústria da construção consome cerca de 40% do total de matérias-primas (areia, pedra britada, cascalho, entre outros), 2/3 de toda a eletricidade, além de ser responsável pela emissão de metade dos gases de efeito estufa, pelo despejo de grande parte das águas residuais e pela geração de 2/3 do total de resíduos (BRIBIÁN *et al.*, 2011; MEGGERS e LEIBUNDGUT, 2010). No Brasil, aproximadamente 40% da extração de recursos naturais têm como destino o setor construtivo e 50% dos resíduos sólidos urbanos vêm das construções e de demolições (OBRECOM, 2011). De acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, a operação de edifícios brasileiros é responsável por cerca de 18% do consumo total de energia do país, por 50% do gasto com energia elétrica e pelo uso de 21% da água servida no país (CBCS, 2011).

Considerando o contexto atual do desenvolvimento sustentável e o fato de que os aspectos econômicos e sócio/culturais comumente são incorporados à edificação, torna-se prioritário construções que minimizem o impacto ao meio ambiente nas etapas de concepção, construção, uso e descarte, atentando para o conforto e vida saudável dos usuários e redução dos custos ao longo da vida útil do empreendimento. Conforme Casagrande Júnior (2011), os passos ambientalmente sustentáveis para um novo modelo de construção, devem basear-se: na aplicação de conceitos projetuais bioclimáticos; na menor utilização do terreno, maior integração ao ambiente natural e entorno; na minimização do uso de recursos minerais não renováveis, energia e água; na implantação de um plano de gerenciamento de resíduos na obra; na promoção da qualidade ambiental interna e externa; na otimização da vida útil das edificações e componentes construtivos visando a maior durabilidade e em função da valorização (reaplicação) dos materiais; na utilização de matérias-primas e materiais de construção de baixo impacto ambiental e que contribuam com a eco-eficiência do processo.

No tocante à seleção de materiais para uma construção ambientalmente mais sustentável é importante considerar o uso de matérias primas e componentes construtivos que causem menor impacto possível sobre a natureza como forma de reduzir os danos causados ao ambiente. Uma das ferramentas que possibilitam a avaliação do impacto ambiental de processo ou produto

é o método de avaliação do ciclo de vida (ACV). De acordo com Sousa (2008), a ACV é uma ferramenta que proporciona uma avaliação qualitativa e produz informações que podem subsidiar a avaliação quantitativa dos danos ambientais provocados não apenas durante os processos produtivos, mas também ao longo dos demais estágios da vida do produto, como na obtenção de matérias-primas elementares e a produção de energia necessária para suprir o processo ou produto. A ACV permite uma análise comparativa considerando uma unidade funcional como objeto de estudo.

No Brasil, existem poucas pesquisas que avaliam e caracterizam os materiais de construção, segundo critérios ambientais, com dados nacionais (OLIVEIRA, 2007; TRAJANO, 2010; MASTELLA, 2002). Além desse fato, os trabalhos se limitam a análise do material ou sistema construtivo isoladamente, desconsiderando o desempenho térmico do mesmo na etapa de uso da edificação. Tal procedimento pode conduzir a uma interpretação equivocada do real impacto ambiental gerado pelo sistema construtivo escolhido. Isto pode ocorrer quando os materiais de construção analisados acarretam poucos danos ambientais nas fases de extração e produção mas solicitam de equipamentos de refrigeração e aquecimento do ar na etapa de uso, requerendo uma maior carga de energia para tornar o ambiente mais confortável para o usuário. Uma das formas de se ponderar esse aspecto é considerar como unidade funcional de um estudo de ACV, não somente a função do material que constitui a envoltória e sim de todo sistema de vedação que proporcione um conforto térmico pré-determinado.

Diante deste cenário, este trabalho se propõe a fazer uma análise ambiental de envoltórias para uma tipologia unifamiliar, em alvenaria de blocos, com desempenhos térmicos similares. A escolha de tal sistema de vedação e tipologia de referência, comumente utilizados em habitações populares, baseia-se na percepção que a ACV poderia ser muito interessante no caso das construções de interesse social. Isso ocorre devido a grande demanda deste tipo de edificação no Brasil, apresentando-se em maior quantidade, responsabilizando-se, desta forma, por uma parcela significativa do total de impactos ambientais gerados pelo setor. Além do mais, a análise pode contribuir para a construção de edificações mais saudáveis do ponto de vista do conforto do usuário e com isso apresentar ganhos indiretamente para sua saúde.

Para alcançar este objetivo, foram analisadas estratégias de condicionamento térmico passivo de acordo com a norma NBR 15220 (2005). Posteriormente, foi realizada uma avaliação do desempenho térmico das paredes externas da tipologia de referência por prescrição, através da verificação das propriedades térmicas dos componentes construtivos e por desempenho,

utilizando-se a simulação computacional. Neste trabalho, para a determinação de envoltórias que proporcionassem mesmo conforto térmico, admitiu-se que as resistências térmicas seriam capazes de descrever o desempenho térmico. Para a compreensão do impacto ambiental gerado pelos sistemas de vedação analisados, a unidade funcional definida para o estudo foi o desempenho térmico do sistema de vedação de uma tipologia residencial de 42 m², situada em Belo Horizonte. Desta forma, conhecendo-se os dados referentes aos processos analisados, utilizou-se a ferramenta de avaliação do ciclo de vida SimaPro 7.1.8, com a finalidade de avaliar todos os aspectos ambientais envolvidos nas etapas referentes a extração de matéria prima, fabricação e transportes, afim de compreender os efeitos ambientais gerados e auxiliar o projetista nas decisões relativas a especificação de materiais.

2. OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho é a análise do desempenho ambiental de envoltórias comumente utilizadas em habitação de interesse social, composta por painéis de blocos rebocados, considerando como unidade funcional o desempenho térmico do sistema de vedação. Para se atingir tal meta os seguintes objetivos específicos devem ser realizados:

- Definição da tipologia de referência e do sistema de vedação;
- determinação da zona de conforto térmico;
- escolha da estratégia de condicionamento térmico passivo;
- caracterização dos materiais de vedação;
- avaliação do desempenho térmico das envoltórias;
- levantamento de dados sobre os materiais dos envelopes construtivos;
- análise ambiental dos sistemas de vedação, tomando-se como unidade funcional a envoltória de uma tipologia residencial situada em Belo Horizonte;
- avaliação dos ciclos de vida das envoltórias, considerando-se como unidade funcional o desempenho térmico do sistema de vedação de uma tipologia residencial situada na cidade de Belo Horizonte.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Análise Ambiental do Ambiente Construído

O setor da construção civil é um marcador de crescimento social/econômico e seu desenvolvimento interfere na infra-estrutura, habitação, transporte, abastecimento de água e energia e conseqüentemente no grau de desenvolvimento econômico local (SOUZA,2006). De acordo com John (2006), a indústria da construção é responsável pela produção e manutenção do ambiente construído que dá suporte às atividades humanas e representa cerca de 15,5% do PIB (produto interno bruto) brasileiro, gerando cerca de 15 milhões de empregos diretos.

Ao mesmo tempo que a construção civil beneficia o crescimento sócio/econômico, esta gera impactos ambientais ao consumir toneladas de recursos naturais, produzir gases poluentes e gerar resíduos (SOUZA,2006). A nível mundial, o setor da construção consome cerca de 40% do total de matérias-primas (areia, pedra britada, cascalho, entre outros), 2/3 de toda a eletricidade, além de ser responsável pela emissão de metade dos gases de efeito estufa, pelo despejo de grande parte das águas residuais e pela geração de 2/3 do total de resíduos (BRIBIÁN *et al.*, 2011; MEGGERS e LEIBUNDGUT, 2010). No Brasil, aproximadamente 40% da extração de recursos naturais têm como destino o setor construtivo e 50% dos resíduos sólidos urbanos vêm das construções e de demolições (OBRECOM, 2011). De acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, a operação de edifícios brasileiros é responsável por cerca de 18% do consumo total de energia do país e por cerca de 50% do consumo de energia elétrica e gastam 21% da água consumida no país (CBCS, 2011). Em uma cidade como São Paulo, o esgotamento das reservas próximas da capital faz com que a areia natural seja transportada de distâncias superiores a 100 km, implicando em enormes consumos de energia e geração de poluição (JOHN,2000).

A fase de uso das edificações também acarreta impacto ambiental específico de acordo com a forma como a energia é consumida para iluminação e condicionamento ambiental, como a água é servida e como o esgoto é destinado. A manutenção, que durante a vida útil de um edifício vai

consumir recursos em volume aproximadamente igual aos despendidos na fase de produção, também gera poluição (JOHN, 1988; JOHN,2000).

A busca pela sustentabilidade em edificações tem como objetivo reduzir os impactos negativos sociais e principalmente os ambientais. Pensar em uma construção mais sustentável, em todas as três dimensões que este conceito engloba: econômica, social e ambiental, implica em uma otimização do uso de recursos naturais, de materiais e componentes construtivos através da análise ambiental de edifícios e de produtos com base em seu ciclo de vida; na diminuição dos custos de manutenção e melhora do desempenho térmico da edificação; na economia de água, no aumento da vida útil da infra-estrutura, na geração de empregos e conseqüentemente na melhoria da qualidade de vida (JOHN, 2006; TOZZI, 2006; ASSIS, *et al.*, 2008).

A análise ambiental do ambiente construído enfatiza as interações do edifício com o meio ambiente através de suas necessidades de consumo e geração de resíduos, as entradas e saídas de seu ciclo de vida em todas as suas fases: projeto, construção, operação e desativação (BUENO,2010).

Neste contexto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) se destaca como um ferramenta importante na análise ambiental de uma edificação. Este método proporciona uma avaliação qualitativa e quantitativa dos danos ambientais provocados não apenas durante os processos produtivos, mas também ao longo dos demais estágios da vida do edifício, como na obtenção de matérias-primas elementares e na produção de energia necessária para suprir o imóvel durante a fase de operação (SOUSA, 2008). O consumo energético referente ao uso de uma edificação está fortemente relacionado ao seu desempenho térmico. Uma habitação energeticamente eficiente deve proporcionar conforto térmico ao usuário, ser dotada de equipamentos com demanda energética mínima e apresentar estratégias de condicionamento térmico passivo adequadas ao clima.

A análise ambiental, baseada na avaliação do ciclo de vida e no desempenho térmico, se torna mais interessante no caso das edificações de interesse social. Tal afirmativa deve-se à grande demanda brasileira por habitações de baixo custo e pela produção de ambientes utilizando-se materiais que apresentam alta carga ambiental em todas as fases de seu ciclo de vida, sem o conhecimento das reais necessidades do morador, desprovidos de conforto ambiental e eficiência energética.

Nas últimas décadas observou-se uma postura mais expressiva por parte do governo brasileiro com intuito de se obter eficácia no combate ao déficit habitacional, com conseqüente elaboração

de políticas e planos de ações específicas, bem como maior disponibilização e investimento de recursos financeiros (BRASIL, 2010). No entanto, a grande maioria das unidades habitacionais, construídas no Brasil, durante este período, não apresentam qualidade no que se refere ao conforto do usuário (MORENO, 2010).

Segundo Oliveira *et al.* (2008), os níveis de satisfação que estão envolvidos em uma habitação vão desde os aspectos de segurança, estabilidade e durabilidade, até os aspectos de conforto, tais como térmico, lumínico, acústico e ergonômico, sendo o conforto térmico responsável por uma grande parcela do conforto ambiental seja nas residências, escolas ou comércio.

De modo geral, observa-se que as unidades habitacionais produzidas no Brasil são implantadas e edificadas por meio de repetição de um mesmo modelo arquitetônico e construtivo padrão ao longo de todo o país, sem qualquer distinção de um lugar para outro. O contexto climático e urbano é desconsiderado num sistema que visa apenas o custo final da edificação, e não se privilegia maiores estudos e adequações a realidade do lugar onde as unidades serão implantadas (MORENO, 2010). O sistema construtivo segue os padrões tradicionais para construção civil sendo o mesmo para todo o país, onde não são considerados os impactos dos materiais e do processo construtivo no meio ambiente (DUMKE, 2002).

No que diz respeito aos moradores e a sua relação com a habitação, para Oliveira *et al.* (2008), é um quesito também tratado como padrão, onde a habitação é definida como economicamente indiferenciada e socialmente controlada. Onde a unidade é projetada para um morador abstrato, cuja referência é apenas a classe social que lhe é definida através de seu nível de renda.

Em seus estudos, Assis *et al.* (2007) demonstram dados acerca dos custos operacionais e do alto consumo e desperdício de energia das habitações, pelo fato de não ser considerado em seu projeto, construção e utilização final, critérios de desempenho e de produção construtiva baseados em arquitetura bioclimática, bem como materiais, equipamentos e tecnologias de baixo impacto ambiental vinculados a eficiência energética.

3.2. Desempenho Térmico de Edificações

A relação do clima externo de uma edificação frente à condição interna por ela proporcionada é antiga e foi originada desde os tempos em que o homem passou a criar seu próprio abrigo. Tal instinto pode ter sido complementado por razões culturais, estratégicas (segurança) ou técnicas

(falta de materiais), mas nunca descartado da condição climática, uma vez que há provas da presença e sobrevivência do ser humano em climas extremos de diferentes temperaturas e umidades. Inúmeras pesquisas sobre técnicas de aclimação passiva e de tecnologias do condicionamento artificial para qualquer meio geográfico se desenvolveram no início do século XXI (MARQUES, 2008). No Brasil, a evolução do conceito de desempenho efetivou-se na década de 80, principalmente através de trabalhos realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para o Banco Nacional da Habitação (BNH), e posteriormente para a Caixa Econômica Federal (CEF), sucessora do BNH (SACHT e ROSSIGNOLO, 2009).

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado ao conforto térmico proporcionado ao usuário associado ao seu balanço energético (BARBOSA, 1997; LEÃO, 2006; MENEZES, 2006; BRAGA, 2007). Para que uma edificação seja energeticamente eficiente é necessário a adoção de equipamentos, materiais de consumo e componentes construtivos adaptados à localização e características do edifício, apresentando conforto de acordo com a atividade específica e operação com demanda energética mínima em relação a edificações similares (MEIER *et al.*, 2002). A partir do entendimento das necessidades requeridas para se prover conforto térmico ao ser humano, pode-se afirmar que esta sensação pode ser advinda da utilização de sistemas passivos de condicionamento térmico, opção que certamente diminuirá o consumo de energia da edificação (ANDREASI, 2001).

Na busca de critérios de projeto com o foco em eficiência energética, deve ser considerada a avaliação climática, mensurando fatores climáticos tais como: radiação solar, radiação de onda longa emitida da Terra para a atmosfera, temperatura e velocidade do ar, umidade relativa e precipitação, que variam conforme latitude, longitude e altitude. Assim, apontam-se as principais formas de interação da edificação com o ambiente: a exposição solar de elementos envidraçados ou opacos do envelope, o efetivo ganho de calor do edifício, a taxa de transferência de calor edificação/ambiente, o potencial de ventilação natural e resfriamento passivo do edifício. As principais características da construção que irão afetar essa interação são: a forma do edifício, orientação e condições de sombreamento das janelas, orientação, tamanho e localização das aberturas, efeito da ventilação na temperatura interna além da espessura e cor das paredes (GIVONI, 1998, *apud* ANDREASI, 2001). Destaca-se assim, a importância da envoltória na eficiência energética e conforto térmico da edificação.

3.2.1. Conforto Térmico

Conforto térmico é definido pela satisfação do indivíduo com o ambiente térmico em que está inserido (ASHRAE, 1993). Pode-se dizer que o homem sente conforto quando o balanço de trocas de calor de seu corpo for nulo e a temperatura da pele e taxa de produção de suor estiverem dentro de certos limites. Nosso corpo possui mecanismos de termorregulação para que a temperatura do mesmo se mantenha estabilizada em 37°C (variando entre 36,1 e 37,2°C), visto que os limites para sobrevivência estão entre 32 e 42°C. Quando há a necessidade de eliminação do calor pelo corpo, este reage primeiramente através do mecanismo de vasodilatação, com aumento do volume sanguíneo e aceleração do ritmo cardíaco e posteriormente com o mecanismo da transpiração. Quando há a necessidade de manter o calor produzido pelo corpo, o primeiro mecanismo a ser ativado é a vasoconstrição, que provoca a diminuição do volume de sangue e do ritmo cardíaco, seguido do mecanismo do arrepio e, caso a sensação de frio ainda seja intensa, haverá aumento do metabolismo, provocando tremor muscular (LAMBERTS *et al*, 1997). É através da pele que as trocas de calor entre o corpo e o meio acontecem, sendo esse um importante órgão na termorregulação. As trocas de calor entre a pele e o meio se dão em forma de trocas úmidas, que acontecem por evaporação, que por envolver mudança de fase o calor trocado é denominado calor latente e trocas secas, que ocorrem por condução, convecção e radiação e são em função unicamente da diferença de temperatura, sendo assim denominado calor sensível (LAMBERTS *et al*, 2007).

O conforto térmico é afetado por muitas variáveis, que são classificadas em variáveis humanas e ambientais. As variáveis humanas são a resistência térmica oferecida pelas roupas que o indivíduo estiver usando e o metabolismo derivado da atividade física do indivíduo, que também pode ser afetado pela idade, sexo, peso, altura, hábitos alimentares, etc. As variáveis ambientais são a temperatura radiante média, a velocidade do ar, a umidade relativa do ar e a temperatura do ar, sendo esta última a principal variável. A velocidade e a umidade do ar são importantes nas perdas de calor por evaporação, responsáveis por cerca de 25% das perdas de calor do corpo humano (LAMBERTS *et al*, 2007).

A atividade que a pessoa exerce irá determinar a temperatura da sua pele e a quantidade de suor secretada. Segundo estudos de Fanger, se a pessoa estiver suando acima de certo nível ou a temperatura de sua pele estiver acima ou abaixo de certo valor, o indivíduo não estará confortável termicamente (LAMBERTS *et al*, 2002).

Para que haja conforto térmico, também é necessário que não haja desconforto localizado. Este fato engloba situações onde são afetadas apenas partes do corpo. As quatro situações mais comuns de desconforto localizado são assimetria de radiação térmica (janelas frias, superfícies não isoladas, calor de fornos ou máquinas, etc), correntes de ar, gradiente de temperatura no sentido vertical (temperatura da cabeça superior à dos pés) e pisos aquecidos ou resfriados (LAMBERTS *et al.*, 2002).

3.2.1.1. Indicadores de Conforto Térmico

Existem vários métodos de se avaliar o efeito conjunto das variáveis do conforto térmico, sendo que o que mais se adapta ao perfil climático brasileiro foi proposto por Fanger, que utiliza um “estado estacionário” ao assumir que um organismo exposto a um ambiente térmico constante por tempo prolongado encontra-se em equilíbrio com o mesmo. Este método leva em consideração as seis variáveis do conforto térmico, relacionando-as com o voto médio estimado (PMV – Predicted Mean Vote) e o índice de pessoas insatisfeitas (PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied), sendo considerado o método mais completo e é descrito na norma ISO 7730/94 - “Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort” (LAMBERTS *et al.*, 2002). Essa norma especifica os critérios de conforto com base em uma correlação entre a sensação térmica e o grau de desconforto das pessoas em determinado ambiente e considera um ambiente confortável quando o percentual de pessoas insatisfeitas não ultrapassa 10%.

Com base nas zonas de respostas fisiológicas e comportamentais dos indivíduos, que variam segundo as atividades que estiver desempenhando e as condições a que está submetido, pode-se determinar uma zona de conforto considerando as vestimentas utilizadas e atividades sedentárias do ser humano. Segundo calculado por Lamberts *et al.*(2002) seguindo o método de PMV, para pessoas nuas a zona de conforto estaria entre 29 e 31°C e para pessoas com vestimenta normal de trabalho a zona de conforto estaria entre 23 e 27°C. Outra faixa de temperaturas para o conforto térmico foi proposta por Givoni e validada por Barbosa e Lamberts (2002) para a cidade de Londrina, Paraná. Segundo Givoni, a zona de conforto estaria entre 18 e 29°C. Nessa proposta não são consideradas a umidade do ar e outras características climáticas, considerando apenas a temperatura do ar, por ser o fator preponderante na avaliação do conforto térmico.

3.2.2. Bioclimatologia

A bioclimatologia estuda as relações entre o clima e o ser humano. Como forma de tirar partido das condições climáticas para criar uma arquitetura com desempenho térmico adequado, Olgyay (1973) criou a expressão Projeto Bioclimático, que visa a adequação da arquitetura ao clima local (LAMBERTS *et al.*, 2007).

Consideram-se normalmente a classificação das escalas do clima, o macroclima, o mesoclima e o microclima. No macroclima são observadas as características climáticas de uma região, normalmente medidas em estações meteorológicas (LAMBERTS *et al.*, 2007). As normais climatológicas são um exemplo de dados medidos em estações climáticas disponíveis para caracterização do clima das cidades. As normais são séries de dados padronizados pela Organização Meteorológica Mundial calculadas para períodos de 30 a 30 anos, obtidas a partir de médias mensais e anuais de totais diários. A série de 1931 a 1960 é a mais recente, e apresenta médias mensais de temperatura, médias das máximas de temperatura, média das mínimas de temperatura, temperaturas máximas e mínimas absolutas, pressão atmosférica, umidade relativa, horas de insolação, precipitação, dentre outras (LAMBERTS *et al.*, 2007). Os dados medidos em estações podem também ser reunidos em arquivos climáticos. Os arquivos podem conter dados de anos específicos ou podem representar o macroclima de uma cidade ou região. Neste caso, há diversas formas de tratamento de dados para que o arquivo seja representativo, em geral, registrando dados de hora a hora, até atingir as 8760 horas que formam um ano completo de 365 dias. O TRY (*Test Reference Year*) é um Ano Climático de Referência, resultado de um tratamento de 30 anos de dados climáticos em que são eliminados os anos que apresentam a menor e a maior temperatura da série. Por fim, é selecionado o ano cujas temperaturas não apresentam extremos (LAMBERTS *et al.*, 2007). Apesar do TRY ser gerado a partir de dados de temperatura, apresenta ainda dados de umidade, direção e velocidade dos ventos, cobertura de nuvens, pressão atmosférica e, às vezes, radiação solar. No mesoclima e microclima, são observadas as alterações locais na radiação solar, temperatura do ar, umidade e vento. Uma grande cidade pode alterar as condições do mesoclima pela poluição que gera ou pelo corte indiscriminado da vegetação, por exemplo. Já o microclima está diretamente relacionado à escala da edificação e de seu entorno imediato, sendo influenciado pelas consequências das outras escalas climáticas e também pela interferência direta na propriedade onde se encontra a edificação (LAMBERTS *et al.*, 2007).

3.2.2.1. Estratégias Bioclimáticas

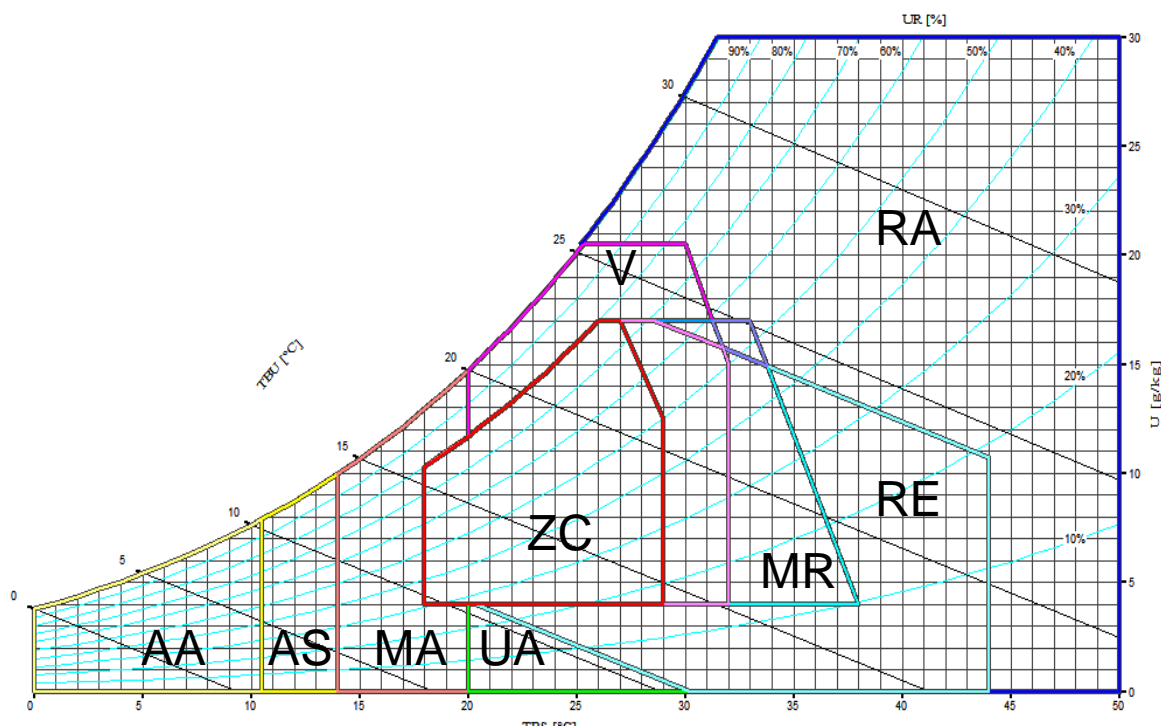
De acordo com Papst (1999), o estudo do conforto térmico através da arquitetura bioclimática encontra-se bastante desenvolvido. Cartas bioclimáticas permitem através do clima externo plotado sobre diagramas, checar as estratégias arquitetônicas mais adequadas para uma determinada localidade. Estas estratégias, corretamente utilizadas durante a concepção do projeto da edificação, podem proporcionar melhoras nas condições de conforto térmico e redução no consumo de energia (LAMBERTS *et al*, 2007).

Na década de 60, os irmãos Olgyay (1963) desenvolveram um diagrama bioclimático que propunha estratégias de adaptação da arquitetura ao clima. Este trabalho foi adaptado por Givoni (1969) que fez uma releitura inovadora. A primeira grande modificação é que a carta de Olgyay tinha como eixo horizontal a escala de umidade relativa, enquanto que a temperatura de bulbo seco era o eixo vertical (STILPEN,2007). Givoni, por sua vez, decidiu traçar seu diagrama bioclimático sobre uma carta psicrométrica. Isso permitiu um salto de qualidade na informação, pois possibilitou a delimitação de zonas de atuação, por meio de estratégias, visando a obtenção do conforto térmico. Outra mudança significativa foi o cenário da análise. A carta de Olgyay é voltada estritamente para o exterior de edificações, enquanto que a de Givoni foi projetada para a avaliação de ambientes internos (STILPEN,2007).

Em 1992, Givoni fez uma atualização em seu trabalho a partir do momento que diversas pesquisas mostraram que pessoas que vivem e trabalham em cidades de países em desenvolvimento, situadas em regiões úmidas e quentes, declararam conforto térmico para valores superiores de temperatura (STILPEN,2007). Desta vez, Givoni constatou a necessidade de haver uma diferenciação das diretrizes para projeto de edificações, baseadas em diagramas de conforto. Propôs então duas cartas bioclimáticas, uma para países de clima temperado e outra para países de clima quente e úmido (STILPEN,2007).

A figura 3.1 mostra o diagrama de Givoni dividido em 12 partes. Trata-se de 9 estratégias bioclimáticas e 3 áreas híbridas, que abrangem duas ou mais estratégias, de forma individual ou simultaneamente. Assim sendo, pode-se optar por uma ou mais táticas de mitigação térmica (STILPEN,2007). Eis as 3 áreas mistas: interseção entre da zona de ventilação e a zona de massa térmica para resfriamento; interseção entre a zona de ventilação, a zona de resfriamento evaporativo e a zona de massa térmica para resfriamento; interseção entre a zona de resfriamento evaporativo e a zona de massa térmica para resfriamento. A avaliação bioclimática pode ser

efetuada através da plotagem, no diagrama de Givoni, das normais climatológicas ou de dados do ano climático de referência (TRY).



- | | |
|--|---|
| ZC – ZONA DE CONFORTO TÉRMICO | V – ZONA DE VENTILAÇÃO |
| AA – ZONA DE AQUECIMENTO ARTIFICIAL | RA – ZONA DE REFRIGERAÇÃO ARTIFICIAL |
| AS – ZONA DE AQUECIMENTO SOLAR | UA – ZONA DE UMIDIFICAÇÃO DO AR |
| MA – ZONA DE MASSA TÉRMICA PARA AQUECIMENTO | MR – ZONA DE MASSA TÉRMICA DE REFRIGERAÇÃO |
| RE – ZONA DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO | |

Figura 3.1 – Carta Bioclimática de Givoni adotada para o Brasil (ANALYSIS BIO 2.1.5, 2011)

Os limites delimitados na carta psicrométrica para zona de conforto, conforme figura 3.2, são: temperatura de bulbo seco entre 18°C e 29°C; umidade relativa do ar entre 20% e 80%; razão de umidade entre 4g/kg e 17g/kg; volume específico entre 0,83m³/kg e 0,87m³/kg. Em um ambiente que esteja nas condições ambientais supracitadas, há uma grande probabilidade de que as pessoas se sintam em conforto térmico (STILPEN, 2007). No entanto, os extremos de temperatura merecem atenção, quando a temperatura interior estiver próxima dos 18°C, deve-se evitar o impacto do vento e próxima de 29°C é interessante controlar a radiação solar sobre as pessoas (LAMBERTS *et al*, 1997).

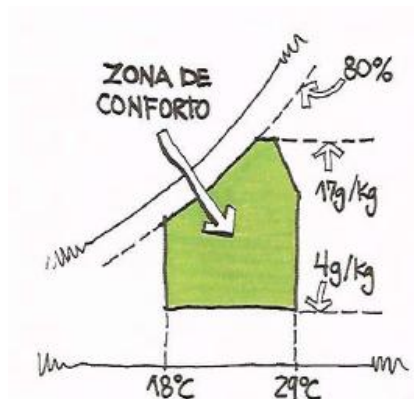


Figura 3.2 – Zona de Conforto (LAMBERTS *et al.*, 1997)

As zonas bioclimáticas, sobre as quais são propostas estratégias de condicionamento térmico passivo para edificação são: a zona de ventilação, de resfriamento evaporativo, zona de massa térmica de refrigeração, zona de massa térmica para aquecimento, zona de aquecimento solar passivo, zona de umidificação do ar.

A região de ventilação fica à direita da zona de conforto e tem um formato delimitado por dez arestas, dentre as quais: temperatura de bulbo seco entre 20°C e 32°C; umidade relativa do ar entre 15% e 100%; razão de umidade entre 4g/kg e 20,5g/kg; volume específico entre 0,85m³/kg e 0,88m³/kg (STILPEN, 2007). Para melhorar o conforto térmico das horas verificadas dentro desta área, algumas estratégias podem ser utilizadas de acordo com o clima da cidade analisada como: ventilação cruzada, ventilação sob a casa, ventilação da cobertura, uso de captadores de vento, projetar espaços fluidos e especificar elementos que direcionem o ar para o interior. Em todos os casos, o espaço exterior deve ser amplo e sem barreiras permitindo a passagem e distribuição do ar (LAMBERTS *et al.*, 1997). A figura 3.3, ilustra a zona de ventilação dentro do diagrama de Givoni e seus limites.

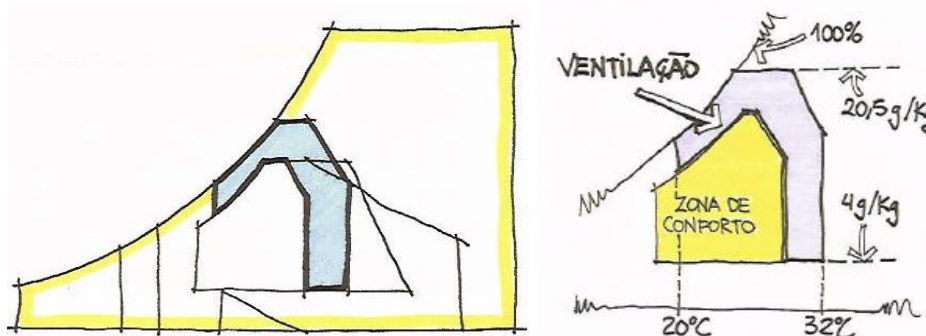


Figura 3.3 – Zona de ventilação (LAMBERTS *et al.*, 1997)

A zona de resfriamento evaporativo (figura 3.4) tem como parâmetros básicos: temperatura de bulbo seco entre 20°C e 44°C; temperatura de bulbo úmido entre 10,5°C e 24°C; razão de umidade entre 0g/kg e 17g/kg. O resfriamento evaporativo é uma estratégia para aumentar a umidade relativa do ar e diminuir a sua temperatura. Pode ser obtido de forma direta ou indireta. A evaporação da água pode causar um duplo efeito benéfico: reduzir a temperatura e, simultaneamente, aumentar a umidade relativa local. O uso de vegetação, de fontes de água ou de outros recursos que resultem na evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar constituem-se em formas diretas de resfriamento evaporativo (STILPEN, 2007). A zona de umidificação é um triângulo situado sob a zona de conforto, com as seguintes delimitações: temperatura de bulbo seco entre 20°C e 30°C; temperatura de bulbo úmido inferior a 10,5°C; razão de umidade entre 0g/kg e 4g/kg. Conforme Lamberts *et al* (1997), quando a umidade relativa do ar é muito baixa, inferior a 20%, há desconforto devido à secura do ar. Nestes casos a umidificação do ar melhora a sensação de conforto, ainda que possa produzir um efeito indesejado de resfriamento evaporativo. As baixas taxas de renovação de ar permitem manter o vapor de água em níveis confortáveis, com mínima evaporação e resfriamento. A figura 3.4 apresenta a localização das zonas de resfriamento evaporativo e umidificação e seus limites.

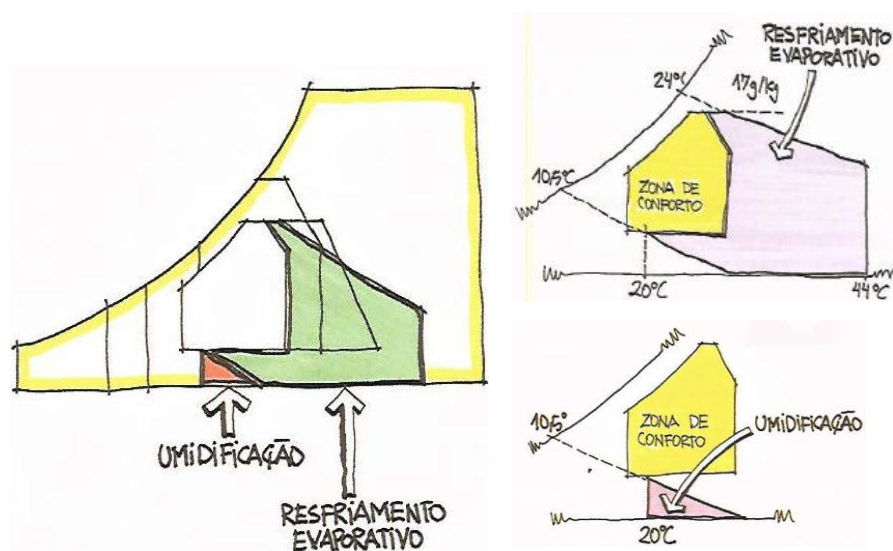


Figura 3.4 – Zona de de resfriamento evaporativo e umidificação (LAMBERTS *et al.*, 1997)

As estratégias relacionadas à massa térmica podem auxiliar a aquecer ou a resfriar a edificação de acordo com as características climáticas da região. A zona de massa térmica para aquecimento localiza-se à esquerda das zonas de conforto, ventilação e umidificação. As fronteiras neste caso são: temperatura de bulbo seco entre 14°C e 20°C e umidade relativa entre 0% e 100%. Nessa

região da carta, pode-se utilizar a massa térmica junto ao aquecimento solar passivo. O aumento da massa térmica com ganho solar pode compensar as baixas temperaturas pelo armazenamento do calor solar, que fica retido nas paredes da edificação e que é devolvido à noite quando as temperaturas são mais amenas. Esta estratégia consiste em usar fechamentos opacos e mais espessos e diminuir as áreas de aberturas orientando-as para o sol (LAMBERTS,1997).

A zona de massa térmica para resfriamento está situada entre: temperatura de bulbo seco entre 29°C e 38°C; razão de umidade entre 4g/kg e 17g/kg; volume específico entre 0,87m³/kg e 0,89m³/kg. A utilização de massa térmica superior nos períodos quentes, auxilia no armazenamento do calor na estrutura térmica (envoltórias, coberturas) da edificação durante o dia que também é devolvido ao ambiente somente à noite, quando as temperaturas externas diminuem. No entanto, para este caso, a massa térmica resfriada durante a noite, serve para reduzir as temperaturas internas durante o dia. (LAMBERTS,1997; STILPEN,2007). A figura 3.5 apresenta a localização das zonas de massa térmica de refrigeração e para aquecimento e seus limites e a figura 3.6 ilustra a utilização das estratégias.

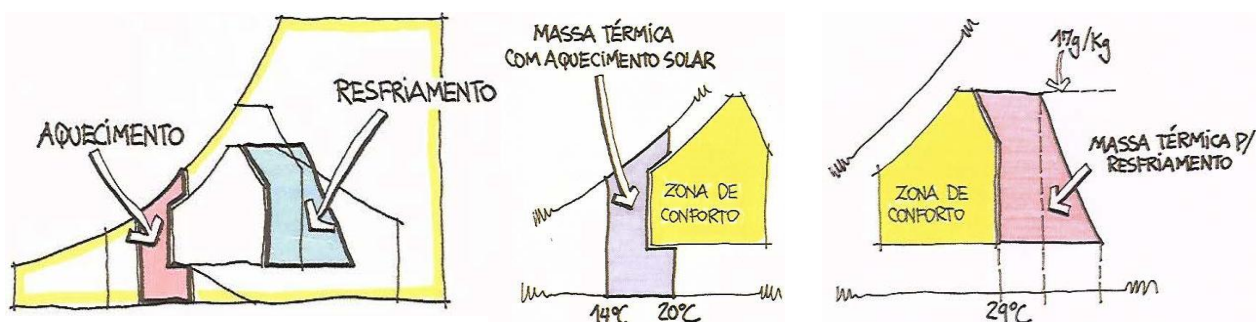


Figura 3.5 – Zonas de massa térmica de refrigeração e para aquecimento (LAMBERTS *et al.*, 1997)

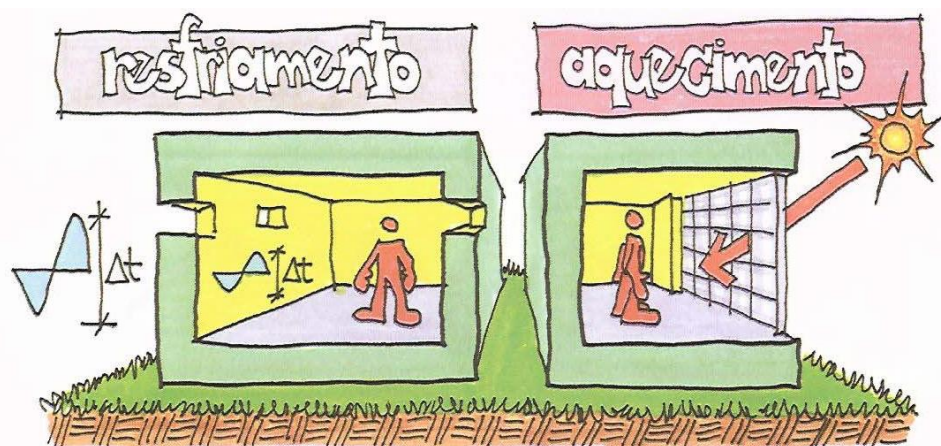


Figura 3.6 – Estratégias de resfriamento e para aquecimento (LAMBERTS *et al.*, 1997)

A zona de aquecimento solar tem como delimitações: temperatura de bulbo seco entre 10,5°C e 14°C e umidade relativa entre 0% e 100%. O projeto do edifício deve incorporar superfícies envidraçadas orientadas ao sol, aberturas reduzidas nas orientações que recebem menos insolação (para reduzir a perda de calor) e proporções apropriadas de espaços externos para se aproveitar o sol no inverno (STILPEN, 2007). A localização e os limites da zona estão ilustrados na figura 3.7.

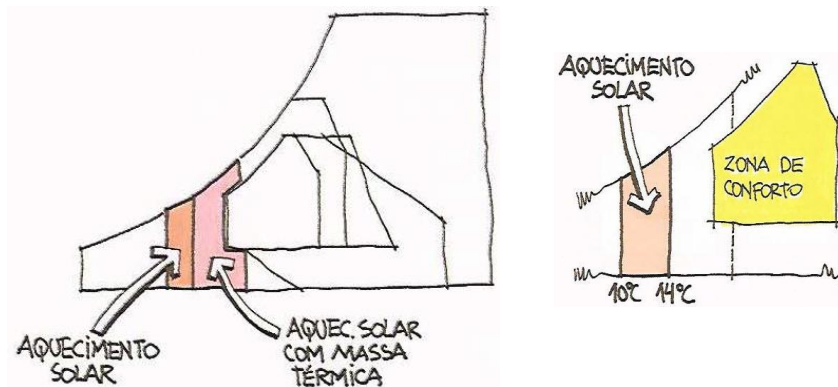
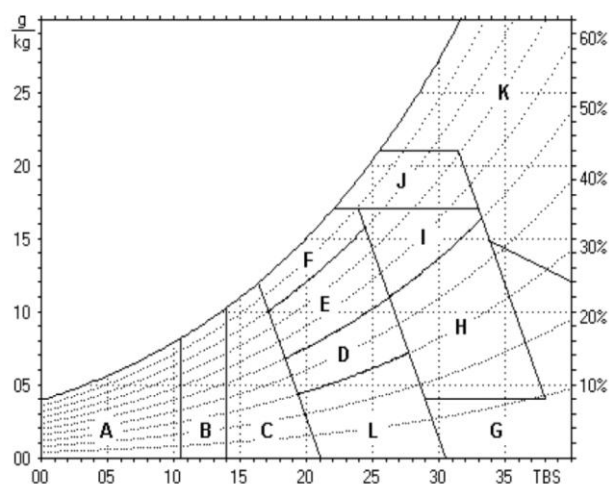


Figura 3.7 – Zona de aquecimento solar (LAMBERTS *et al.*, 1997)

Roriz *et al.* (1999) propuseram um método de classificação bioclimática que posteriormente serviria de base para a norma da ABNT NBR 15220 (2005). Para tal, foram efetuadas adaptações sobre a Carta Bioclimática de Givoni (figura 3.8). A alteração foi motivada pelo resultado obtido da aplicação da carta bioclimática original que apresentou um zoneamento no qual climas admitidos como distintos foram agrupados em uma mesma zona e climas semelhantes em zonas diferentes. Desta forma, para tornar o método mais sensível à realidade climática brasileira, admitiu-se as seguintes alterações: foram inclinados os limites de temperatura à esquerda e à direita da zona de conforto, pois as pessoas sentem mais calor quando submetidas a umidades mais altas e limites originais (linhas verticais) não identificaram certos períodos reconhecidamente quentes de algumas cidades; a zona de conforto ficou dividida em 2 sub-zonas, a zona D, com umidades relativas entre 30 e 50%, e a zona E, para umidades entre 50 e 80%; na carta adaptada, a estratégia de ventilação foi dividida nas zonas J e I, sendo que a zona J só é aplicável quando altas temperaturas se conjugam com altas umidades, possibilitando distinção entre a ventilação seletiva (noturna) da ventilação permanente; o limite inferior de umidade da zona de conforto passou a ser definido pela curva de umidade relativa e não pela linha horizontal (umidade absoluta) indicada na carta original e criou-se a zona F, para a qual se recomenda a substituição do ar úmido interior pelo ar exterior mais seco, exigindo taxas de ventilação menores que a zona J (RORIZ *et al.*, 1999).



- | | |
|---|--|
| A – Zona de aquecimento artificial (calefação) | G + H – Zona de resfriamento evaporativo |
| B – Zona de aquecimento solar da edificação | H + I – Zona de massa térmica de refrigeração |
| C – Zona de massa térmica para aquecimento | I + J – Zona de ventilação |
| D – Zona de Conforto Térmico (baixa umidade) | K – Zona de refrigeração artificial |
| E – Zona de Conforto Térmico | L – Zona de umidificação do ar |
| F – Zona de desumidificação (renovação do ar) | |

Figura 3.8 – Carta bioclimática adaptada e suas estratégias de condicionamento térmico (RORIZ *et al.*, 1999)

3.2.3. Métodos de avaliação de Desempenho Térmico

Para se avaliar o conforto térmico são vários os critérios que podem ser considerados, dependendo do referencial, avaliação e recomendação que se deseja fazer. Como visto, no Brasil a produção das habitações de interesse social de modo geral é notada com problemas, sendo as avaliações realizadas através de estudos que em sua maioria têm o intuito de subsidiar procedimentos para transformação deste quadro (MORENO, 2010). Estas avaliações podem ser feitas tanto na fase de concepção do projeto, escolha do sítio como também posteriormente a construção. Seja com o intuito de que estes estudos sirvam como base para a indicação de melhorias nas próprias habitações como também para balizar e recomendar diretrizes para o projeto e construção de outras habitações, de modo a evitar os mesmos erros e falhas (MORENO, 2010).

A realização destas avaliações, comumente se dá por meio de análises de desempenho térmico da habitação. Estas análises são realizadas segundo índices e escalas de conforto térmico selecionado para embasamento, onde as escalas de conforto térmico são montadas de acordo com sensações subjetivas graduadas por conforto e desconforto térmico, diretamente relacionado a parâmetros físicos de estímulo. Por meio dos índices são estabelecidas zonas de conforto térmico delimitadas

graficamente em cartas diagramas que prescrevem parâmetros físicos e zonas de conforto térmico (LEÃO, 2006).

Para a escolha das zonas de conforto térmico, muitas pesquisas buscam estabelecer caminhos definidos, por meio do estabelecimento de limites que possam atender de forma ampla diversas pessoas e regiões. Dessa maneira, tem-se estudos como o de Givoni (1992) que relacionam dados climáticos, diretrizes de projeto e zonas de conforto térmico aliadas a cartas bioclimáticas (MORENO, 2010).

A avaliação do desempenho térmico, na fase de projeto, pode ser feita através da verificação do cumprimento de recomendações e diretrizes (avaliação por prescrição) e/ou por meio de simulação computacional (avaliação por desempenho), utilizando-se como parâmetros os limites de temperatura e umidade estabelecidos pela zona de conforto escolhida. Após a construção da edificação, a análise pode ser feita através de medições *in loco* de variáveis de desempenho.

No Brasil, em 1990 no I Encontro Nacional de Conforto e Ambiente Construído, levantaram-se discussões em torno de uma possível maneira de se estruturar a avaliação do desempenho térmico de forma mais adequada ao contexto brasileiro. Já na série seguinte deste mesmo encontro, em 1993, Barbosa e Lamberts (1993) em seu trabalho apresentaram uma proposta que consistia de elementos a serem empregados na norma brasileira de avaliação de desempenho térmico e energético de edifícios, baseada no estudo de sete normas estrangeiras. Dentre tais elementos estavam a definição de símbolos e unidades, mecanismos para utilização de dados climáticos, propriedades térmicas de componentes construtivos, procedimentos para avaliação de desempenho térmico em edificações residenciais unifamiliares (MORENO, 2010).

A proposta inicial teve sequência, e resultou em recomendações baseadas e organizadas em grupos de componentes globais dentro dos limites estabelecidos, com utilização de materiais e tipologias construtivas regionais. Em 2005 foi aprovada a Norma do Zoneamento Bioclimático Brasileiro – NBR 15220 que faz referência a todo o território nacional. Esta norma apresenta recomendações para avaliar o desempenho térmico de habitações de interesse social. A metodologia adota um zoneamento bioclimático do Brasil, que propõe a divisão do território brasileiro em oito zonas quanto ao clima, adaptando a Carta Bioclimática sugerida por Givoni (1992). Para cada uma destas zonas, são apresentadas recomendações tecnoconstrutivas de adequação climática e estratégias de condicionamento térmico passivo, visando à otimização do desempenho térmico das edificações, tais como: tamanho das aberturas para ventilação; proteção

das aberturas; vedações externas (tipo de parede externa e cobertura, considerando-se transmitância térmica, atraso térmico e absorvência à radiação solar). A norma também estabelece e descreve o cálculo dos valores admissíveis para as características termofísicas de elementos construtivos para cada Zona Bioclimática: transmitância (U), atraso térmico (ϕ) e fator solar (FS_o) (MENEZES, 2006). Estas propriedades térmicas servem de parâmetros para a avaliação do desempenho térmico por prescrição.

Em relação à avaliação por desempenho, Menezes (2006) afirma que a utilização de programas de simulação tem sido cada vez maior, porque permitem diagnosticar um caso real modelado e avaliar o seu desempenho quando submetido a alterações de suas características (tipologia construtiva, uso, iluminação, equipamentos, etc.) sem as dificuldades das medições *in loco*. No entanto, deve-se a atentar para a importância das medições no local visto que permitem a calibração e validação dos modelos. Usualmente, a avaliação por desempenho é realizada após o estabelecimento da zona de conforto através da quantificação das horas de desconforto anual comparando o resultado com o limite aceitável estabelecido. Para pesquisas em que se deseja determinar um material ou sistema que possui o melhor desempenho térmico é verificado qual apresenta menor quantidade de horas fora da zona do conforto (BARBOSA,1997).

3.3. Avaliação do Ciclo de Vida

As primeiras tentativas de se avaliar o potencial de impacto ambiental de produtos ocorreram em fins de 1960 e início dos anos 70 por meio de REPAs (Resource and Environmental Profile Analysis), ou seja, Análises do Perfil de Recursos Naturais e Meio Ambiente. Segundo Sonnemann *et al.* (2003), um estudo realizado pela Coca-Cola, por meio do instituto de pesquisa MRI, Midwest Research Institute, enfocou a comparação de diferentes tipos de embalagens, objetivando determinar quais delas ocasionariam menores impactos ambientais. Em 1974, outra avaliação conduzida por Hunt comparou nove diferentes tipos de recipientes para bebidas. Em 1979, com a criação da SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry), Sociedade para Toxicologia e Química Ambiental, foram lançadas as bases para o desenvolvimento da metodologia da ACV. Desde então, diversos estudos vêm sendo realizados para avaliar as questões ambientais relacionadas ao consumo de energia, matéria-prima, geração e disposição de resíduos sólidos. produtos ou serviços. Este processo desencadeou o desenvolvimento da série de normas ISO 14040, voltada para a normalização de estudos em ACV e criação de grupos de pesquisa. Tal fato direcionou a metodologia não só para os

segmentos industriais, como também para políticas governamentais, públicas e privadas. Consequentemente, tornou-se indispensável a construção e a disponibilização de *softwares* e bancos de dados para agilizar o detalhamento e o processamento das informações (SILVA, 2005; SONNEMANN *et al.* 2003 apud SOARES, 2009).

Análise do ciclo de vida ou avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta da gestão ambiental que avalia o desempenho ambiental de produtos durante todas as fases de sua vida (SILVA, 2005). Trata-se de um procedimento sistemático para mensurar os impactos que um material ou produto causa no meio ambiente e sobre a saúde humana ao longo de todo o seu ciclo de vida (OLIVEIRA, 2007). O ciclo de vida nada mais é que a história do produto, desde a fase de extração das matérias primas, passando pela fase de produção, distribuição, consumo, uso e até sua transformação em lixo ou resíduo, conforme ilustrado na figura 3.9. Por exemplo, quando se avalia o impacto ambiental de um carro deve-se considerar não só a poluição causada pelo funcionamento do veículo, mas, também, os possíveis danos causados por seu processo de fabricação, pela energia que utiliza, pela produção de seus diversos componentes e seu destino final (RIBEIRO, *et al.* 2009).

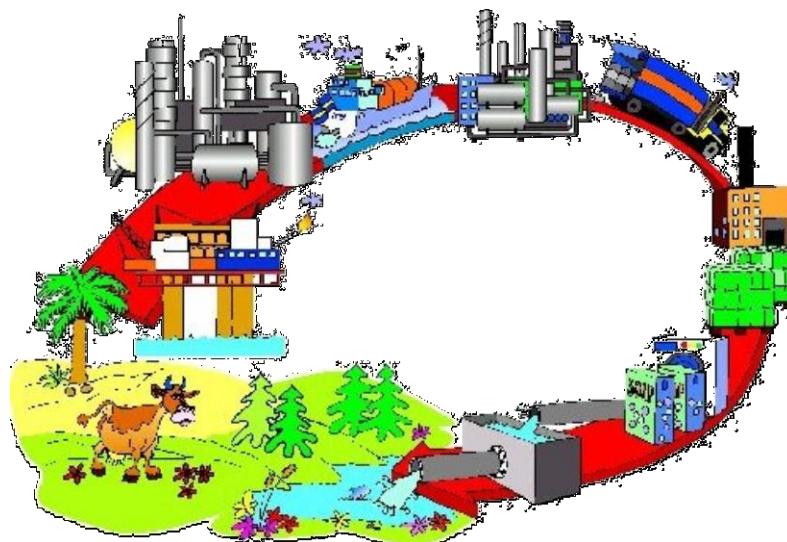


Figura 3.9 – Análise do Ciclo de Vida (MATERIO DESIGN, 2009)

Conforme Ribeiro, *et al.* (2009), a análise do ciclo de vida leva em conta as etapas “do berço à cova” ou considerando-se o aproveitamento do produto após o uso, do “berço ao berço”. A figura 3.10 apresenta as etapas que podem ser contempladas em uma avaliação do ciclo de vida de determinado produto. A ACV também permite identificar quais estágios do ciclo de vida têm contribuição mais significativa para o impacto ambiental do processo ou produto estudado.

Empregando-a é possível avaliar a implementação de melhorias ou alternativas para produtos, processos ou serviços. Declarações ambientais sobre o produto podem se basear em estudos de ACV, bem como a integração de aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento de produtos (*design for environment*) (COLTRO *et al*, 2007).

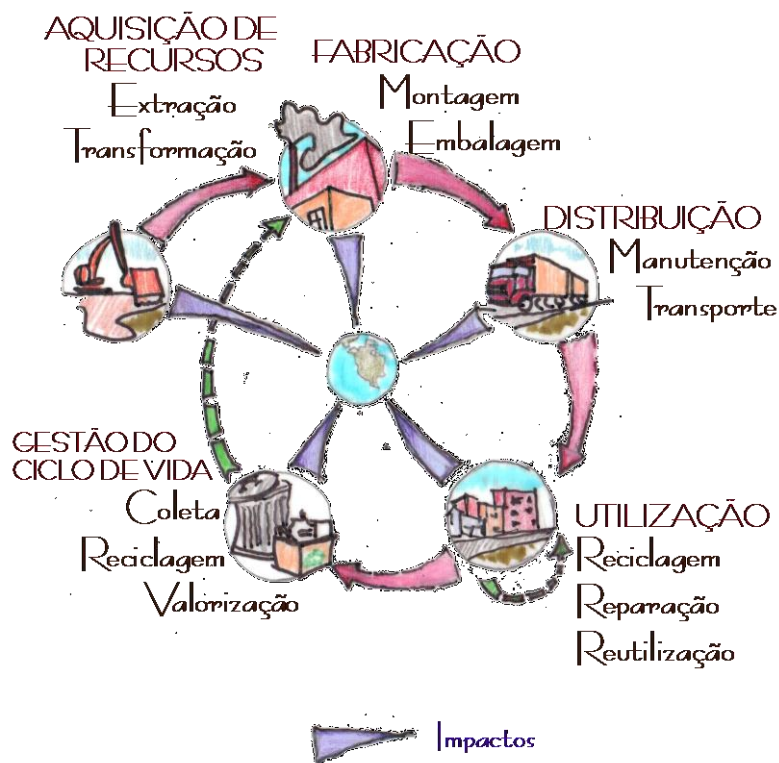


Figura 3.10 – Etapas do Ciclo de Vida (adaptado de CIRAIG, 2009)

Trata-se de uma ferramenta de apoio à tomada de decisões que gera informações a partir de um inventário de entradas e saídas presentes em vários processos ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo. A contabilidade destas entradas e saídas é útil na avaliação do desempenho ambiental de um produto, ou ainda na comparação entre produtos diferentes.

No entanto, a avaliação do ciclo de vida não resolve problemas, ou seja, é necessário a realização de análises a partir dos dados inventariados (SILVA, 2007). Em geral é conveniente usar a informação desenvolvida em um estudo de ACV como parte de um processo de decisão muito mais abrangente, ou usá-la para compreender as soluções de compromissos amplas ou gerais. Comparar resultados de diferentes estudos de ACV só é possível se as suposições e o contexto de cada estudo forem os mesmos. É conveniente que estas suposições sejam explicitamente declaradas, por razões de transparência (NBR 14040, 2009).

3.3.1. Normas

Conforme Coltro *et al.* (2007), muitos estudos de ACV, aparentemente iguais, chegavam a conclusões diferentes devido às considerações feitas, fronteiras adotadas, idade dos dados, tecnologias, logística de abastecimento de matérias-primas e matriz energética, que são fatores críticos para os parâmetros inventariados. Estes estudos diferiam inclusive na interpretação do que seria um sistema mais adequado para o meio ambiente. Apesar de todas estas restrições, estudos comparativos foram divulgados e causaram impacto no mercado de produtos concorrentes. Assim, ficou evidente a necessidade de padronização da metodologia de ACV. A Instituição que mais contribuiu neste sentido foi a SETAC – *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* que reuniu pesquisadores líderes na área para discutir o tema ACV em cerca de nove conferências internacionais organizadas entre os anos de 1990 e 1993. Deste esforço resultou a publicação *SETAC Guidelines for Life Cycle Assessment – a Code of Practice* (CONSOLI *et al.*, 1993 *apud* COLTRO *et al.*, 2007), que foi o primeiro documento voltado à padronização da metodologia de ACV e que, mais tarde, orientou os trabalhos de normalização internacional da ISO – *International Organization for Standardization*.

Estas normas têm como objetivo fornecer para as empresas ferramentas que avaliam os métodos de fabricação, pois permitem selecionar indicadores ambientais e rotular as empresas como cumpridoras das regras ambientais (LIBRELOTTO, 2006). Os trabalhos de normalização internacional da ACV pela ISO envolveram mais de 300 especialistas em ACV de cerca de 29 países, que atuaram direta ou indiretamente na padronização, e que geraram a série de normas ISO 14040 relativas à ACV. A norma NBR ISO 14040 (2001) foi internalizada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, mediante trabalho desenvolvido pelo Sub-Comitê de Avaliação do Ciclo de Vida - SC-05 do Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental - ABNT/CB-38. A partir de 2006, as normas as normas ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043 foram compiladas nas norma ISO 14040 (2006) e 14044 (2006):

- ISO 14040. Life Cycle Assessment. Principles and Framework. (2006) (Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Estrutura)
- ISO 14044. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines.(2006)(Avaliação do Ciclo de Vida Requisitos e Diretrizes)

Em maio de 2009, no Brasil, foram publicadas:

- ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.
- ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações.

3.3.2. Etapas

Um estudo de ACV, segundo a Norma NBR ISO 14040 (2009), é dividido em quatro etapas, conforme apresentado na figura 3.11. Resumidamente, na primeira fase, definição do objetivo e escopo, o propósito do estudo e sua amplitude são definidos, envolvendo decisões importantes sobre as fronteiras e a unidade funcional. Na fase de análise de inventário, informações sobre o sistema do produto são levantadas e as entradas e as saídas consideradas relevantes para o sistema são quantificadas. Na fase de avaliação de impacto, os dados e as informações geradas durante a análise de Inventário são associados a impactos ambientais específicos, de modo que o significado destes impactos potenciais possa ser avaliado. E, na fase de interpretação, os resultados obtidos nas fases de análise de inventário e de avaliação de impacto são combinados e interpretados de acordo com os objetivos definidos previamente no estudo (COLTRO *et al*, 2007).

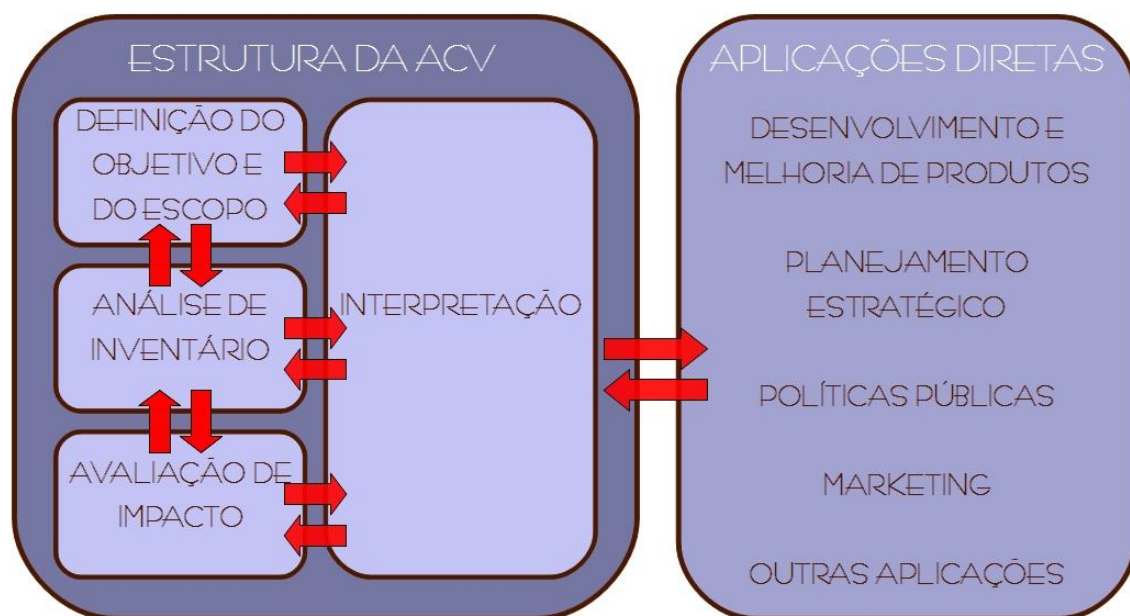


Figura 3.11 – Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida (NBR ISO 14040, 2009)

3.3.2.1. Definição do Objetivo e do Escopo

A ACV inicia-se com a definição do objetivo e escopo do estudo, determinação da unidade funcional adotada, das fronteiras do sistema, as estimativas e limitações e os métodos de alocação que serão usados, bem como as categorias de impacto que serão consideradas no estudo (COLTRO *et al*, 2007).

A descrição do produto analisado, o propósito e os limites da pesquisa são as fases que caracterizam esta etapa (NBR ISO 14044, 2009). O objetivo do estudo deve especificar a aplicação pretendida e o público alvo a quem serão comunicados resultados. Nesta fase é importante definir a unidade funcional, principalmente em estudos comparativos de diferentes produtos, de forma a quantificar o sistema e permitir a determinação de fluxos de referência (SOARES, 2009). A unidade funcional é a unidade de referência quantitativa à qual todos os fluxos de entradas e saídas na ACV estão relacionados (COLTRO *et al*, 2007).

3.3.2.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A análise de inventário do ciclo de vida envolve fundamentalmente os procedimentos de coleta de dados e de cálculo dos quantitativos de entrada e saída. Corresponde à descrição do sistema produtivo, quantificando e qualificando, em relação à unidade funcional, os *inputs* (recursos materiais e energéticos) e *outputs* (emissão de resíduos sólidos, líquidos e gasosos) relacionados às atividades de extração e beneficiamento das matérias-primas, processamento industrial, manufatura, distribuição e transporte, bem como manutenção, reciclagem e disposição final (figura 3.12). Procedimentos de alocação dos fluxos elementares devem ser considerados para os processos que produzam mais de uma saída ou que promovam a reciclagem de produtos intermediários (SOUSA, 2008).

Conforme Silva (2005), a análise do inventário fundamenta-se em seis etapas interativas, envolvendo a preparação para coleta de dados; definição dos critérios de qualidade dos dados; coleta e validação de dados; refinamento das fronteiras do sistema; instituição de procedimentos de cálculo, de forma a permitir o relacionamento dos dados às unidades de processo e unidade funcional, e por fim, a aplicação de critérios para a alocação dos impactos ambientais. Após a compilação dos dados, faz-se, geralmente, uma redefinição do escopo (LIMA, 2006)

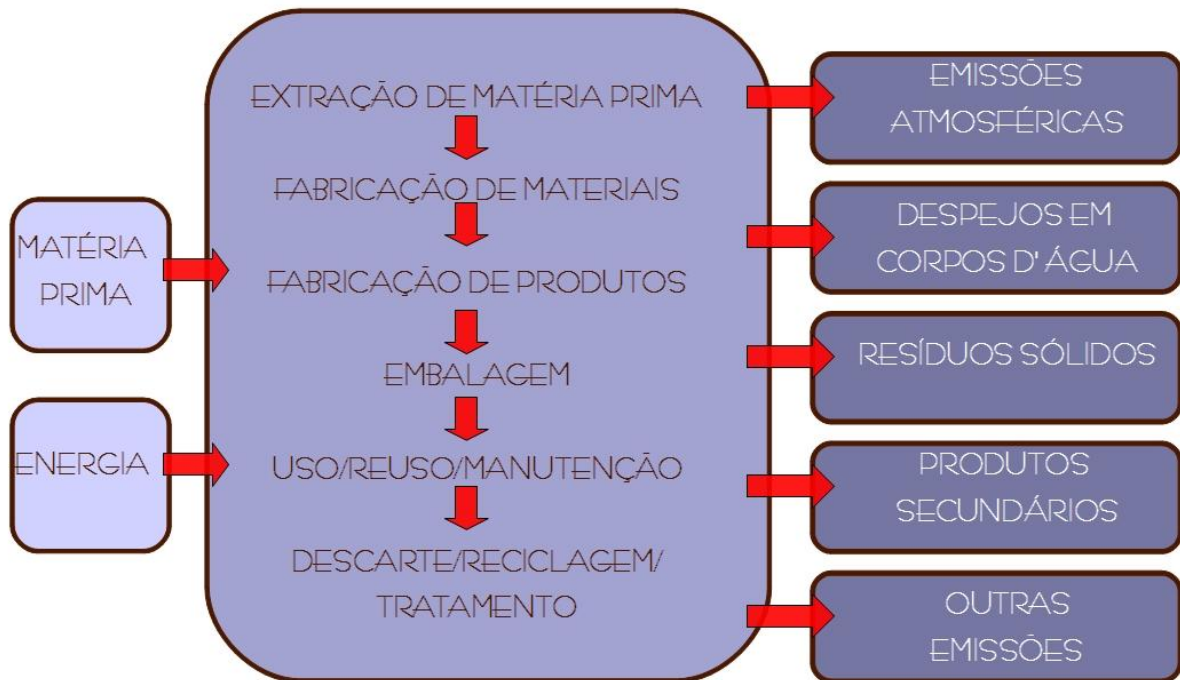


Figura 3.12 – Análise de inventário do ciclo de vida (SOARES, 2009)

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

A fase de avaliação do impacto da ACV é dirigida à avaliação da significância de impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de inventário do ciclo de vida. Em geral, este processo envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreender estes impactos. O nível de detalhe, a escolha dos impactos avaliados e as metodologias usadas dependem do objetivo e do escopo do estudo (NBR ISO 14040, 2009). Nesta fase, os resultados do inventário são interpretados e comparados através de um processo quantitativo e/ou qualitativo, de forma a classificar, caracterizar, normalizar e valorar os potenciais impactos sobre os ecossistemas, saúde humana e a depleção de recursos naturais (SILVA, 2005). Assim, as categorias de impacto relevantes e seus respectivos potenciais de impacto são estabelecidos e é realizado o cálculo dos indicadores de cada categoria. A agregação dos resultados, por vezes ponderados, define o perfil da AICV e fornece informações relativas aos impactos ambientais associados ao consumo de recursos e emissões ao meio. A AICV, permite avaliar a magnitude de aspectos ambientais apresentados durante a etapa de inventário e agregar as intervenções em vários ou um único indicador (SONNEMANN *et al*, 2003 *apud* SOARES, 2009).

Os fluxos elementares do sistema são relacionados aos impactos gerados ao meio ambiente, em nível global, regional ou mesmo local. Conforme a norma NBR ISO 14044, AICV compreende elementos obrigatórios e opcionais. Dentre os elementos obrigatórios, figura 3.13, destacam-se:

- a.1) Seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- a.2) Correlação dos resultados do inventário às categorias de impacto selecionadas (classificação);
- a.3) Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

a.1) Seleção de categorias de impacto

Consiste na escolha e definição de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização que compõem o método de AICV (SOARES, 2009). A escolha baseia-se nos objetivos, escopo da pesquisa e nas condições ambientais locais. As categorias de impacto selecionadas devem refletir o perfil ambiental do sistema de produto em estudo (SOUSA, 2008).

a.2) Classificação

Refere-se à correlação das cargas ambientais do inventário com as diferentes categorias de impacto selecionadas. Os resultados do ICV podem ser relacionados a uma ou mais categorias. No entanto, a dupla contagem de cargas ambientais deve ser evitada (SOUSA, 2008). Dentre as categorias de impacto utilizadas em métodos existentes, pode-se citar aquecimento global, redução do ozônio estratosférico, acidificação, utilização de recursos naturais e uso do solo (SOARES, 2009).

a.3) Caracterização

Envolve a agregação das cargas ambientais dentro de cada categoria de impacto e sua conversão para unidades comuns (indicadores de categoria), resultando em um único índice numérico por categoria. Este passo é realizado mediante ao uso de fatores de caracterização (SOUSA, 2008).

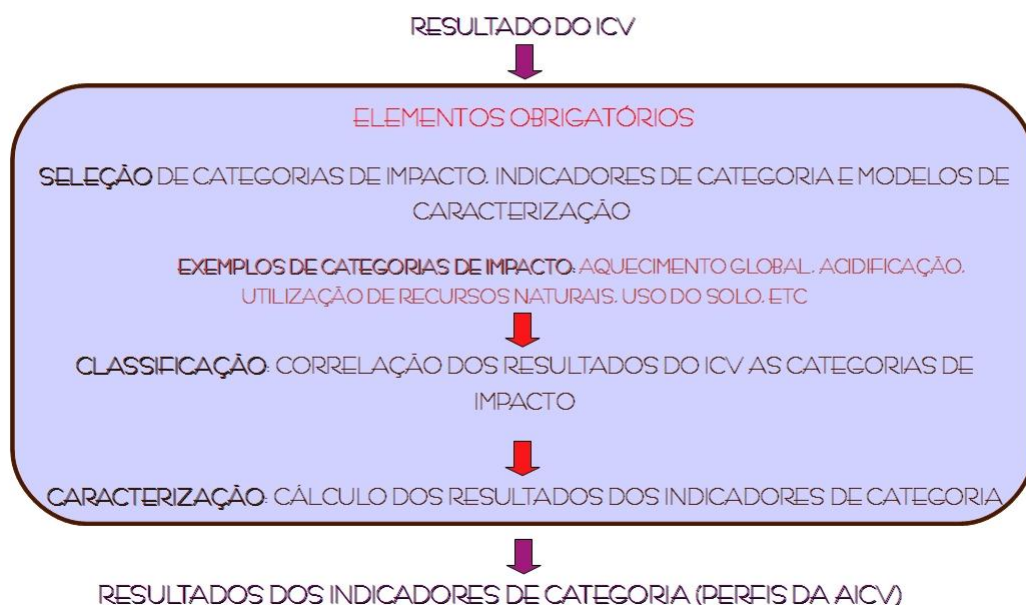


Figura 3.13 – Elementos Obrigatórios da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (SOARES, 2009)

A norma ABNT NBR ISO 14044 (2009), determina elementos opcionais como: b.1) Normalização; b.2) Agrupamento; b.3) Ponderação.

b.1) Normalização

Cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria referente a informações de referência. A normalização transforma um resultado de indicador pela divisão deste por um parâmetro selecionado (NBR ISO 14044, 2009).

b.2) Agrupamento

Agregação de categorias de impacto em grupos semelhantes podendo envolver hierarquização (NBR ISO 14044, 2009).

b.3) Ponderação

Consiste na atribuição de pesos (fatores de ponderação) a cada categoria de impacto ou conjunto, destacando sua importância com relação aos demais (SOUSA, 2008). Os potenciais para diferentes impactos são avaliados segundo sua severidade e, de acordo com o resultado, são estabelecidos diferentes fatores de ponderação (SOARES, 2009).

A análise adicional da qualidade dos dados, para melhor compreensão da significância, incerteza e sensibilidade dos resultados da AICV, pode ser realizada através de técnicas e informações adicionais. Entre as técnicas existentes pode-se citar a análise de contribuição, a análise de incerteza e a análise de sensibilidade (NBR ISO 14044, 2009). A figura 3.14 sintetiza todos os elementos opcionais presentes em uma avaliação de impacto do ciclo de vida.

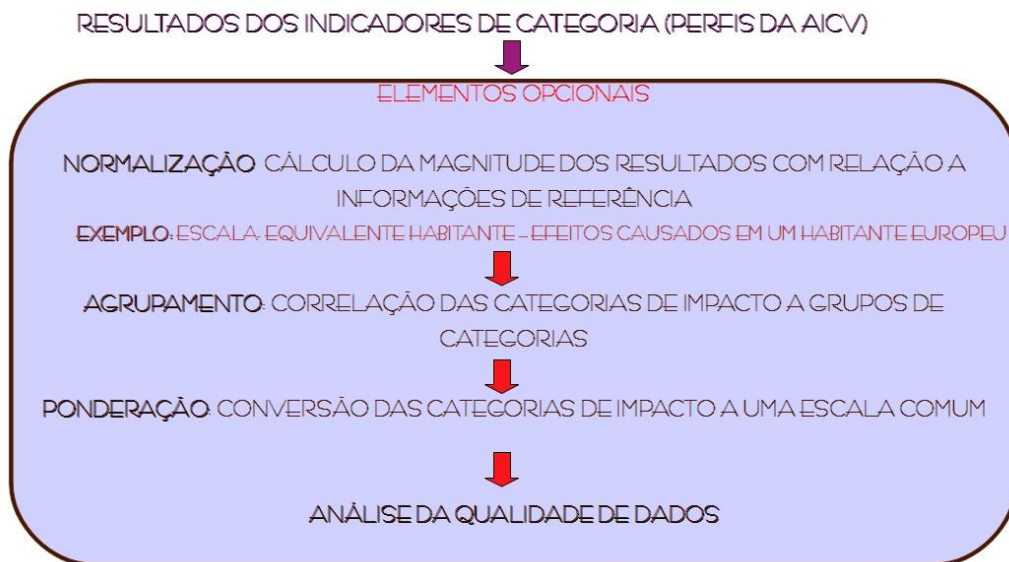


Figura 3.14 – Elementos Opcionais da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (SOARES, 2009)

3.3.2.4. Interpretação

Para finalizar um estudo de ACV, é preciso realizar a análise e interpretação de todas as constatações e resultados do ICV e/ou da AICV, confrontando-os com os objetivos e escopo estabelecidos, possibilitando uma formulação de conclusões e recomendações para a minimização de impactos ambientais potencialmente gerados pelo sistema coletados (SOUSA, 2008).

3.3.3. Elementos Fundamentais da ACV

Além da elaboração do fluxograma do ciclo de vida do sistema a ser analisado e do procedimento para o desenvolvimento do estudo de ACV, ainda existem três elementos fundamentais para se entender o conceito da ACV (COLTRO *et al*, 2007).

3.3.3.1. Unidade Funcional

A unidade funcional é definida como o desempenho quantificado de um sistema de produto e tem como objetivo primário servir de unidade de referência do estudo. Portanto, a quantificação/mensuração da função corresponde à unidade funcional. Assim, todos os dados do estudo de ACV são relacionados à unidade funcional, ou seja, todas as entradas e saídas do sistema são relacionadas a esta unidade. Portanto, esta unidade precisa ser bem definida e mensurável. Como exemplos tem-se 1.000 kg de café torrado e moído disponível para distribuição, 1.000 kg de água tratada pronta para o consumo, 1 m² revestido por tinta por um período de um ano (SILVA, 2005; COLTRO *et al*, 2007; NBR ISO 14044, 2009).

3.3.3.2. Fronteiras do Sistema

A fronteira (limites) do sistema determina quais processos elementares devem ser incluídos na ACV. A seleção da fronteira do sistema deve ser consistente com o objetivo do estudo. Os critérios utilizados na sua determinação devem ser identificados e explicados (NBR ISO 14044, 2009). Conforme Coltro *et al.* (2007), as fronteiras precisam ser estabelecidas em diversas dimensões, a saber:

- Fronteiras em relação aos sistemas naturais: fronteira entre o sistema técnico e o meio ambiente, ou seja, especificação do início e do fim do sistema;
- Fronteiras geográficas: delimitação da área do sistema estudado;
- Fronteiras temporais: perspectiva de tempo do estudo, isto é, passado, presente ou futuro;
- Fronteiras dentro do sistema técnico relacionadas com a produção: definição das atividades que constam do ciclo de vida do produto estudado que serão incluídas no estudo, bem como daquelas que serão excluídas;

- Fronteiras dentro do sistema técnico relacionadas com o ciclo de vida de outros produtos: quando um processo produtivo gera diversos produtos, a carga ambiental deve ser distribuída entre os vários coprodutos.

3.3.3.3. Alocação

Situações que requerem critérios de alocação ocorrem em estudos de ACV quando o ciclo de vida de produtos diferentes são interligados. Pode-se citar como exemplos de ciclos de vida interligados a produção de queijo e leite, óleo diesel e gasolina, etc (COLTRO *et al*, 2007). A norma NBR ISO 14044 sugere que a alocação seja evitada sempre que possível de duas formas: ampliando as fronteiras do sistema de modo que os co-produtos sejam incluídos no estudo ou dividindo o processo de tal forma que possa ser descrito como dois processos distintos onde cada um tem uma única entrada. Se não for possível evitá-la a norma sugere atribuição de uma carga ambiental com base em uma causalidade física com massa ou conteúdo energético de saídas.

A figura 3.15 apresenta as relações descritas nas etapas da ACV entre os mecanismos ambientais, as categorias de impactos e os indicadores ambientais. Os resultados do inventário são relacionados às categorias de impactos (*midpoints*), convertidos em indicadores ambientais (*endpoints*) e agregados em grupos de danos. Após a normalização, o processo de valoração permite a mensuração da magnitude dos impactos e a consequente definição do perfil ambiental do sistema, conferindo subsídios para a interpretação dos resultados (SILVA, 2005).

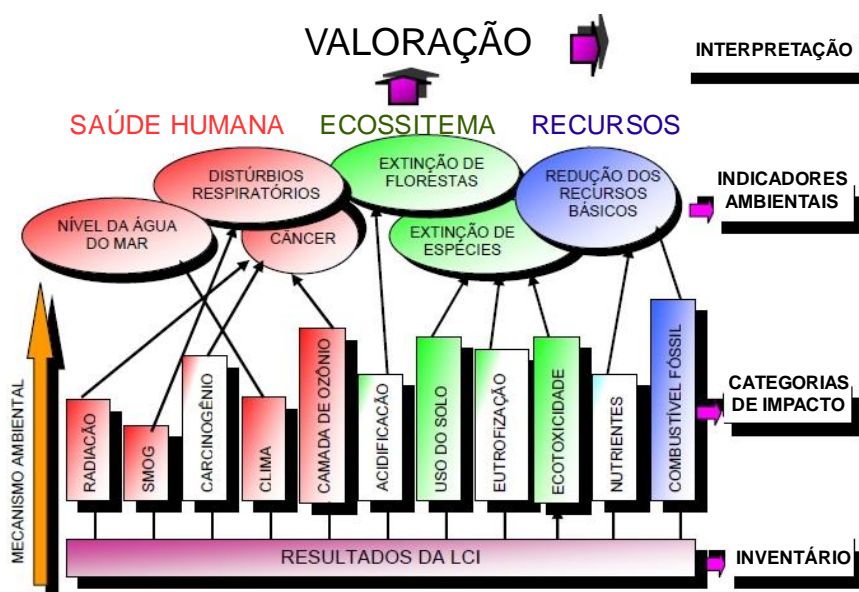


Figura 3.15 – Relação entre os mecanismos ambientais, categorias de impactos e indicadores ambientais (SILVA, 2005).

3.3.4. Aplicações da ACV

De acordo com Coltro *et al.* (2007) , a ACV é uma metodologia importante pois trata com clareza de questões ambientais complexas, gerando números que permitem a tomada de decisões em bases objetivas. Assim, trata-se de uma ferramenta muito útil para subsidiar o entendimento e/ou gerenciamento de temas complexos, tais como:

- Gerenciamento e preservação de recursos naturais;
- Identificação dos pontos críticos de um determinado processo / produto;
- Otimização de sistemas de produtos;
- Desenvolvimento de novos serviços e produtos;
- Otimização de sistemas de reciclagem;
- Definição de parâmetros para atribuição de rótulo ambiental a um determinado produto

Conforme Librelotto (2006), a ACV também serve de base para o gerenciamento do ciclo de vida – LCM (sigla em inglês). O conceito de LCM considera o ciclo de vida do produto como um todo e otimiza a interação entre o projeto do produto, a produção e as atividades do ciclo de vida. Projetar os produtos levando em conta seu ciclo de vida é um dos desafios enfrentados atualmente pelos fabricantes. Assim, os esforços feitos para aumentar a eficiência dos processos ao longo do ciclo de vida não implicam somente em estender a responsabilidade entre as partes envolvidas. Desse modo, o objetivo do LCM é proteger os recursos naturais e maximizar a eficiência por meio da ACV, do gerenciamento dos dados do produto, de suporte técnico e, inclusive, da análise de custo do ciclo de vida - ACCV. Portanto, o LCM é um conceito e não um método ou ferramenta, como por exemplo a ACV e a ACCV, etc. Entretanto, a relação entre o conceito de LCM e as ferramentas ainda não está bem estabelecida e vem sendo discutida em congressos e publicações.

A busca por produtos e processos mais sustentáveis vem ganhando importância cada vez maior nas indústrias, de modo que o sucesso econômico das empresas depende cada vez mais da extensão em que as mesmas conseguem atender as demandas do desenvolvimento sustentável. A eco-eficiência é uma filosofia de gerenciamento segundo a qual as empresas são encorajadas a se

tornar mais competitivas e inovadoras ao mesmo tempo em que praticam, também, uma maior responsabilidade em relação ao meio ambiente. Em muitos casos a eco-eficiência representa uma otimização ecológica de todo o sistema ao mesmo tempo em que considera também os fatores econômicos envolvidos. Portanto, a ACV possibilita a visualização de várias interfaces das diversas etapas do ciclo de vida com o meio ambiente (LIBRELOTTO, 2006).

3.3.4.1. Aplicações na Construção Civil

Conforme Librelotto (2006), as diversas aplicações de estudos de ACV na construção civil podem ser classificadas do seguinte modo:

- Avaliação de materiais de construção - com a finalidade de melhorias no processo e produto final, ou informação à projetistas (inserção de dados ambientais sistematizados em catálogos);
- Ferramentas computacionais e instrumentos de informação aos projetistas funcionando como suporte a tomada de decisões e auxílio ao projeto - especializadas no uso de ACV para medir ou comparar o desempenho ambiental de materiais e componentes da construção civil .

Amôeda (2004) *apud* Librelotto (2006), apresenta um modelo de ciclo de vida dos produtos de construção baseado no conceito de níveis de sistemas para introduzir a fase de utilização nos estudos de ACV e, desse modo, considerar a totalidade do ciclo de vida. Este modelo é composto por seis fases de ciclo de vida e quatro níveis de sistema que relacionam cronologicamente o produto com a complexidade do sistema que o integra (pode ser visualizado na figura 3.16):

- Extração de matérias primas (nível de sistema 1);
- produção de materiais ou componentes (níveis de sistema 2 e 3);
- Construção: durante a fase de construção, os materiais são aplicados para formar um edifício, sendo transportados dos níveis de sistema 1, 2 ou 3 até ao nível de sistema 4, começando o produto a fazer parte da função e poder ser relacionado com a unidade funcional;
- Utilização e manutenção dos edifícios (nível de sistema 4);
- Demolição: a demolição de um edifício indica o fim da unidade funcional, sendo esta transformada outra vez num produto;

- Tratamento de resíduos, deposição e reutilização e/ou reciclagem (níveis de sistema 1 a 3): os resíduos provenientes da demolição podem ser tratados de vários modos, pelo que dependendo do destino do produto enquanto resíduo, o nível de sistema pode estar entre 1 e 3.

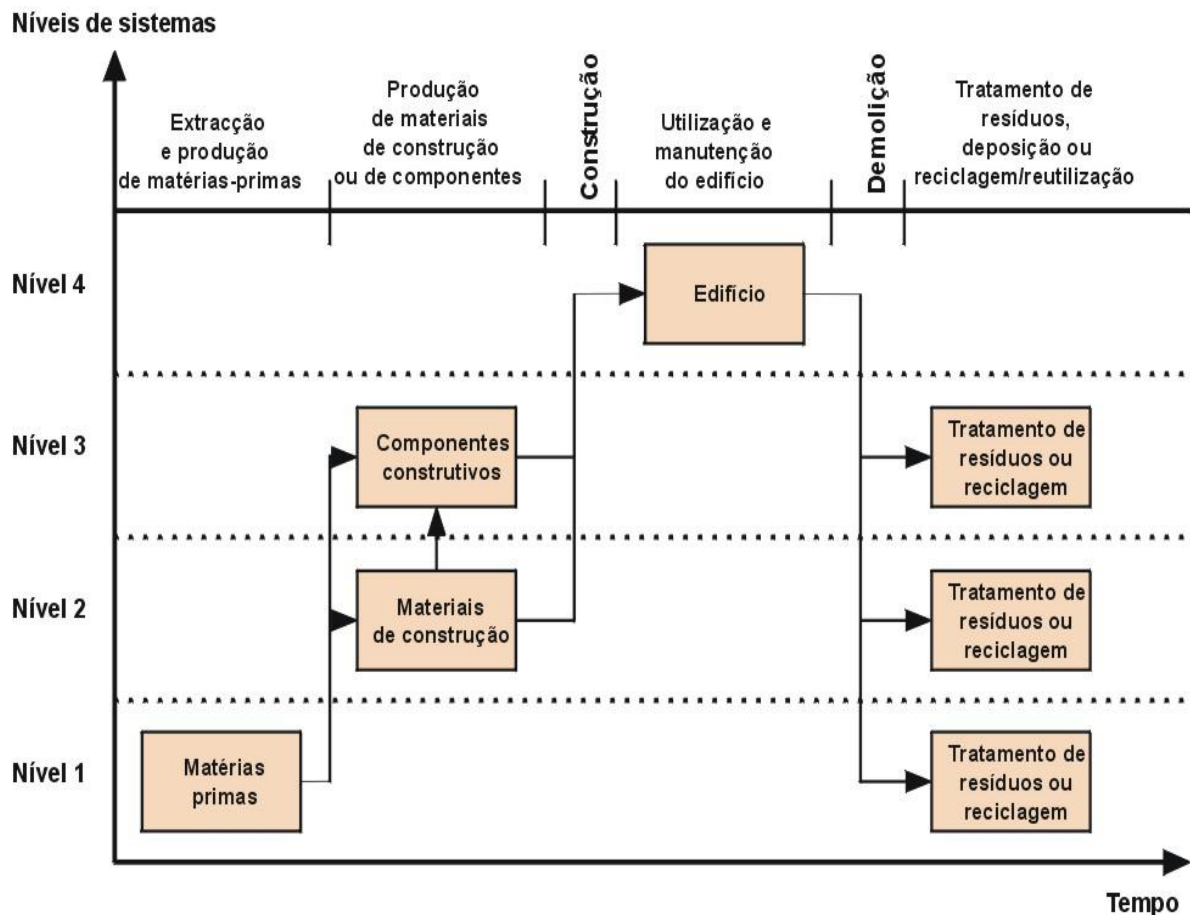


Figura 3.16 - Níveis de sistemas do ciclo de vida de um edifício como produto (PAULSEN, 2001 *apud* LIBRELOTTO, 2006).

Segundo SILVA (2003), atualmente no Brasil a aplicação direta de ACV à avaliação de edifícios mostra-se realmente muito complexa e impraticável: complexa porque os edifícios são compostos por inúmeros materiais diferentes, cada um com seus processos próprios. Esses fatores não inviabilizam o emprego de ACV, mas aumentam expressivamente a quantidade de informações envolvida e a dificuldade em obtê-las e impraticável, no caso brasileiro, porque ainda existem poucos dados confiáveis de ACV de materiais de construção nacionais. No momento, a maioria dos recursos disponíveis são bases de dados estrangeiras, cenário que vem mudando, porém muito lentamente. Na falta de dados nacionais, estas bases podem ser

utilizadas como ponto de partida, desde que fique claro que: trata-se de dados estrangeiros que não necessariamente refletem processos e condições utilizadas no Brasil, mas podem dar uma noção da magnitude dos impactos e que estas entradas de dados serão oportunamente substituídas, na medida em que forem coletados e tratados os dados nacionais correspondentes (SILVA, 2003). A figura 3.17 apresenta o ciclo de vida de uma edificação.



Figura 3.17 - Ciclo de Vida de uma Edificação (TAVARES *et al.*, 2005)

3.3.5. Ferramentas para a Análise do Ciclo de Vida

Com o intuito de sistematizar a ACV, algumas ferramentas informatizadas e específicas para a aplicação da metodologia foram desenvolvidas. Estes *softwares* apresentam bancos de dados editáveis e métodos que podem ser escolhidos de acordo com o objetivo da pesquisa. Os recursos computacionais auxiliam na compilação dos dados do inventário e no cálculo dos impactos, facilitando, desta forma a interpretação dos resultados.

3.3.5.1. Bancos de Dados e Métodos

Dentre as bibliotecas de dados pode-se citar algumas presentes no *software* SimaPro caracterizadas na tabela 3.1. Com relação ao gerenciamento dos dados, além dos bancos estarem capacitados a promover atualizações, substituição e adição de dados ao inventário, viabiliza-se uma combinação entre dados, personalizando o estudo.

Tabela 3.1 – Principais bancos de dados, focos e fontes de coleta de dados (SILVA, 2005)

Bancos de dados	Foco	Fonte
BUWAL 250 database (1997)	Materiais de embalagem (plástico, papel, vidro), energia, transportes e tratamentos de resíduos;	BUWAL 250, desenvolvido pela EMPA, com base em dados suíços;
Data archive (PRé4 database) (1988- 1995)	Materiais, energia, transporte, processamento e tratamento de resíduos;	Várias fontes públicas como a APME, BUWAL 132, ETH, SPIN, <i>Chalmers</i> , <i>Kemna</i> , dentre outras;
Industry data	Vários processos industriais de produção;	Dados coletados de várias associações industriais como a APME;
IDEMAT 2001 (Holanda)	Contempla uma diversidade de materiais de engenharia como metais, plásticos e madeira, energia e transporte;	Dados coletados de várias fontes sob a supervisão da <i>Faculty of Industrial Design Engineering, Delft Technical University</i> ;
FRANKLIN USA 98 (Estados Unidos)	Energia, transporte, aço e plásticos além de outros materiais, envolvendo as etapas de processamento, manufatura e uso do produto;	<i>Franklin Associates</i> : dados públicos e industriais, fontes estatísticas e de literatura;
ETH – ESU 96 (Suíça)	Dados relativos à produção e importação de combustíveis e produção de eletricidade, incluindo emissões associadas à extração de energia primária, refinamento, extração de recursos minerais, produção de matérias-primas, energia transporte e serviços de tratamento de resíduos.	ESU-group (Suíça)
Ecoinvent data v2.2 (Suíça)	Dados referentes a utilização de energia, extração de recursos, fornecimento de materiais, produtos químicos, metais, agricultura, serviços de gestão de resíduos, e serviços de transporte.	ecoinvent Centre (Swiss Centre for Life Cycle Inventories)

Silva (2005) descreve alguns métodos, usualmente disponibilizados por vários *softwares* de apoio à análise do ciclo de vida, para avaliação de impactos que auxiliam na interpretação de dados, como o Eco-indicator 99, CML method 92, Ecopoints 97 e o EPS 2000 (tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Métodos empregados para avaliação de impactos ambientais (SILVA, 2005)

Método	Características
Eco-indicator 99	A pontuação fornecida pelo Eco-indicator 99 baseia-se na metodologia de avaliação de impactos que transforma os dados da planilha de inventário em pontuações de dano. De acordo com as necessidades e escolha do usuário, os dados podem ser agregados em grupos de danos como recursos (combustíveis fósseis e minerais), qualidade dos ecossistemas (acidificação/eutrofização, ecotoxicidade e uso do solo) e saúde humana (liberação de compostos orgânicos e inorgânicos respiráveis, radiação, mudança climática, depleção da camada de ozônio e emissão de substâncias carcinogênicas), ou em uma pontuação única;
CML method 92	Método desenvolvido pelo <i>Centre for Environmental Science of Leiden University</i> (CML), tendo por princípio, a utilização de indicadores referenciais. Os resultados do inventário são convertidos a partir de fatores de caracterização ou equivalência, sendo posteriormente normalizados em relação a uma base de referência, gerando um único indexador dos impactos ambientais por classe de impacto, seguida de um índice ambiental para o sistema;
Ecopoints 97	Este método baseia-se no princípio da distância até o alvo. A distância entre o nível atual de um impacto e o nível alvo indica a gravidade da contribuição de uma determinada emissão;
EPS 2000	Neste método, calcula-se a cadeia completa de causa e efeito de cada impacto sobre o equivalente humano.

O método Eco-indicator 99 é o mais citado na literatura internacional e utilizado em pesquisas (TAKEDA, 2008). o Eco-indicator 99, desenvolvido pela Pré Consultants BV, da Holanda, contrasta com os modelos baseados em *midpoints*, que lidam com várias classes de impactos isoladas, a concentração da avaliação de impactos ambientais em três grupos de danos (saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos) reduz as incertezas, além de facilitar a compreensão dos efeitos (GOEDKOOOP, 2001; SILVA, 2005). Para conferir suporte ao desenvolvimento de avaliações de impactos ambientais, a estrutura do Eco-indicator 99 está fundamentada no conceito de eco-indicadores. Os eco-indicadores são números que expressam

os impactos ambientais resultantes de processos e produtos. O processo de avaliação do impacto, ilustrado na figura 3.18, envolve a caracterização dos efeitos ambientais; avaliação dos danos ambientais sobre a saúde humana, qualidade dos ecossistemas e depleção dos recursos naturais; normalização e valoração dos impactos ambientais (SILVA, 2005).

Como princípio metodológico, de acordo com as necessidades e escolha do usuário, os resultados do inventário podem ser agrupados em grupos de danos relativos a recursos (minerais e combustíveis fósseis), qualidade dos ecossistemas (acidificação/eutrofização, ecotoxicidade e uso do solo) e saúde humana (substâncias carcinogênicas, substâncias orgânicas respiráveis, substâncias inorgânicas respiráveis, radiação, mudança climática e depleção da camada de ozônio), ou em uma pontuação única, refletindo o índice ambiental do sistema (SILVA, 2005).

Conforme Gama (2010), os danos para a saúde humana são expressos em número de anos perdidos e número de anos vividos com deficiência; os danos na qualidade dos ecossistemas são expressos na forma de perda de espécies numa dada área, durante um determinado tempo e os danos nos recursos são expressos no excesso de energia necessário para futuras extrações de minerais e combustíveis fósseis.

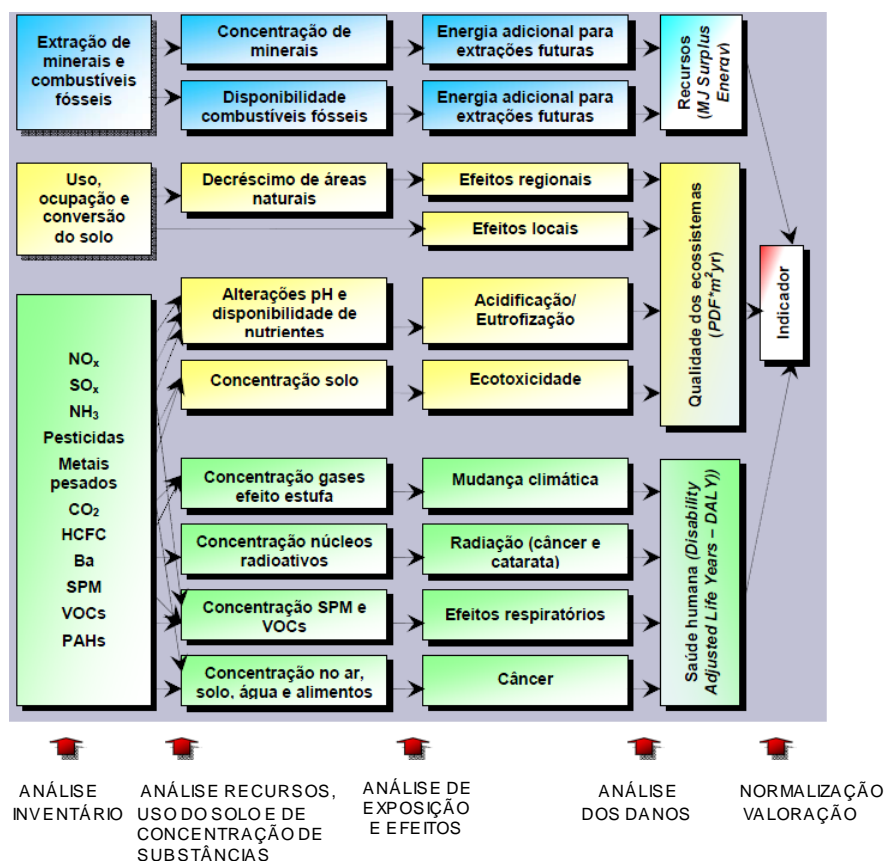


Figura 3.18 - Representação da metodologia do Eco-indicador 99 (SILVA, 2005)

3.3.5.2. Softwares

No contexto específico da construção civil, o mercado concentra várias ferramentas computacionais capacitadas a subsidiar análises do ciclo de vida para materiais de construção, componentes e edifícios. Eles consistem, basicamente, em interfaces com o usuário, bancos de dados, sistemas de cálculo e módulos para elaboração do relatório final, cabendo destacar o GaBi, UMBERTO, LCAiT e o SimaPro (SILVA, 2005; SOUSA, 2008).

O sistema de *software* GaBi4 é uma ferramenta para construir balanços de ciclo de vida que suporta a manipulação com grande quantidade de dados e com modelação do ciclo de vida do produto. Calculando balanços de diferentes tipos, ajudando agregar os resultados. Conforme Rodrigues, *et al.* (2008), as suas principais características são: é baseado num conceito modular. Isto significa que planos, processos, fluxos e suas funcionalidades estabelecem unidades modulares; dados de análise de impacto, inventário e modelos de ponderação estão separados, os módulos são facilmente manuseados e depois interligados para o cálculo ACV; várias fases do ciclo de vida, como produção, utilização e deposição, podem ser capturados em módulos e depois modificados separadamente; outra característica da estrutura modular é que o software e a base de dados são unidades independentes. Dentro da base de dados toda a informação é guardada, por exemplo, modelos de produto e perfis ecológicos. As bases de dados GaBi4, são sempre construídas com uma estrutura básica definida. O próprio *software* disponibiliza ao utilizador a interface para a base de dados. Via interface do utilizador, os dados armazenados podem ser lidos e modificados. No caso do GaBi4, a interface com o usuário está disponível em alemão, inglês, japonês, holandês, tailandês, português, espanhol, chinês e italiano. Esse *software* é uma ferramenta para ACV de produtos 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 especialista para realizar um estudo completo e atendendo todos os pontos exigidos pela ferramenta (RODRIGUES, *et al.*, 2008).

O Umberto é uma ferramenta de *software*, comercializada para modelar, calcular e visualizar materiais e sistemas de fluxo de energia. É utilizado para analisar o processamento de sistemas, quer em planta quer em companhias, ou, ao longo do ciclo de vida dos produtos. Os resultados podem ser alcançados acedendo aos indicadores econômicos e ambientais. Informação de custeio de materiais e processos podem ser integrados para apoio das decisões de gestão. Facilidade no manuseio e qualidade das ferramentas de apresentação dos resultados na forma relatórios, gráficos, diagramas, tabelas, etc (LOPES, 2009).

No LCAit , os dados ACV são documentados de acordo com o formato SPINE permitindo comunicar a informação a outras partes eletronicamente e de forma transparente. Os dados, incluindo a documentação, podem ser exportados para ou importados de outro *software*. Os fluxos do processo e fatores de análise de impacto podem ser importados de qualquer folha de cálculo ou programa de processamento de texto. O seu fabricante, *Ekologiks* oferece uma base de dados de análise de impacto incluindo fatores de caracterização e de ponderação (RODRIGUES, *et al.*,2008).

O SimaPro é o *software* que se destaca por ser o mais utilizado internacionalmente, oferecendo uma enorme flexibilidade, modelagem parametrizada, análise de resultados interativos e tem uma grande base de dados incluída (SEQUEIRA, 2010). O nome desta ferramenta resulta de “*System for Integrated Environmental Assessment of Products*”, em português, sistema para avaliação ambiental integrada de produtos. De acordo com Librelotto (2006), o SimaPro é uma ferramenta comercial de ACV que permite recolher, analisar e monitorar o desempenho ambiental. O usuário pode modelar e analisar ciclos de vida complexos, de forma sistemática e transparente. As etapas são interligadas e por isso as alterações isoladas em qualquer uma delas podem comprometer a confiabilidade da ACV. Sequeira (2010) descreve as características que o SimaPro apresenta:

- Uma interface com utilizador bastante completa, o explorador ACV guia o usuário seguindo os princípios das normas ISO 14040 e ISO 14044;
- Modelagem parametrizada com análise de cenários;
- Bases de dados de inventário, incluindo muitos de processos, bem como os métodos avaliação do impacto ambiental mais importantes;
- Filtragem de inúmeras opções disponíveis para todos os resultados;
- Análise de tratamentos de resíduos complexos e cenários de reciclagem;
- Análise de Monte Carlo, permitindo a contemplação da incerteza dos dados.

A análise utilizando-se o *software* SimaPro é estrutura em quatro etapas: definição do objetivo e âmbito; inventário; avaliação de impacto e interpretação.

A definição dos objetivos e escopo abrange: a escolha do tipo de ACV a ser conduzida dentre as cinco possibilidades pré-definidas pelo *software*; descrição das razões para a condução da análise e as partes interessadas envolvidas, assim como dos aspectos relevantes para cada projeto em análise; estabelecimento da unidade funcional e dos fluxos de referência; seleção das bibliotecas de dados disponibilizadas pelo SimaPro; especificação dos indicadores de qualidade dos dados (DQI's), que envolve além da especificação da cobertura temporal e geográfica, o tipo de

tecnologia e a representatividade dos dados para a ACV, a delimitação das fronteiras do sistema e a instituição das regras para a alocação dos impactos ambientais; descrição dos cenários alternativos a serem avaliados, utilizando análises de sensibilidade; especificação de níveis de proteção para o acesso e edição dos dados (SILVA, 2005). Os indicadores de qualidade dos dados (DQI's): tempo, geografia, tipo, sistema de repartição e de fronteiras referem-se às escolhas metodológicas que precisam ser feitas no âmbito de cada meta e ACV. O objetivo destes indicadores é ajudar a compreender em que medida os dados a partir de bibliotecas são compatíveis com as exigências do seu próprio projeto. Depois de ter fixado estes indicadores de qualidade dos dados, cada campo será designado por uma cor que depende da correspondência entre os dados e as propriedades desejadas. Há quatro cores para indicar em que extensão de um processo coincide com o projeto a ser desenvolvido. Observa-se que a cor verde indica que o material ou processo escolhido é aplicável ao seu projeto. A correspondência amarela ou laranja é menos estreita e, finalmente, vermelha significa que, embora utilizável, o processo ou o material não se adequa aos requisitos do seu projeto (CARVALHO, 2008).

Com relação à etapa de construção do inventário, para facilitar a checagem dos balanços de massa, a inserção dos dados de entrada relativos a materiais, transporte, energia, processamento e uso, é organizada em *inputs* da ecosfera (extraídos diretamente dos recursos naturais, incluindo ainda, as respectivas emissões), *inputs* da tecnosfera-materiais e combustíveis (fluxos mássicos relativos a materiais já industrializados) e *inputs* da tecnosfera, eletricidade/calor (fluxos não mássicos fornecidos por sistemas industriais, relacionados às etapas de transporte e processamento). Quanto aos *outputs*, uma ampla lista de substâncias é apresentada, seguida da especificação da quantidade e unidade. A entrada de novas substâncias é possível, cabendo destacar a necessidade da sua inclusão nos métodos de avaliação de impactos ambientais, observando os critérios metodológicos requeridos (SILVA, 2005).

A avaliação de impacto é realizada após a escolha do método e utiliza-se de elementos obrigatórios e opcionais da metodologia de ACV: caracterização, avaliação de danos, normalização, ponderação e pontuação única. Para a caracterização dos efeitos ambientais, o programa gera uma listagem com os resultados do inventário, com posterior multiplicação pelos fatores de caracterização, típicos de cada método de avaliação. No que diz respeito à avaliação de danos, normalização e valoração, o usuário pode definir valores e pesos para cada método de avaliação dos impactos ambientais. Caso o método esteja capacitado com o estágio de avaliação de danos, os fatores de atribuição de pesos são diretamente aplicados aos grupos de danos e às categorias de impactos ambientais (SILVA, 2005).

A apresentação e interpretação dos resultados do inventário e da avaliação de impactos ambientais é realizada a partir de árvores e redes de processos (figura 3.19), gráficos (figura 3.20) e planilhas ambientais, estando o *software* habilitado a desenvolver, automaticamente, análises de contribuição, individuais e acumulativas, de diferentes produtos e estágios de produção, evidenciando os fluxos e processos de maior significância ambiental. Os efeitos ambientais podem ser analisados por quantidade, categoria de impacto ambiental, indicador (categoria de dano, normalizado ou valorado), ou através de um índice ambiental para o sistema (SILVA, 2005).

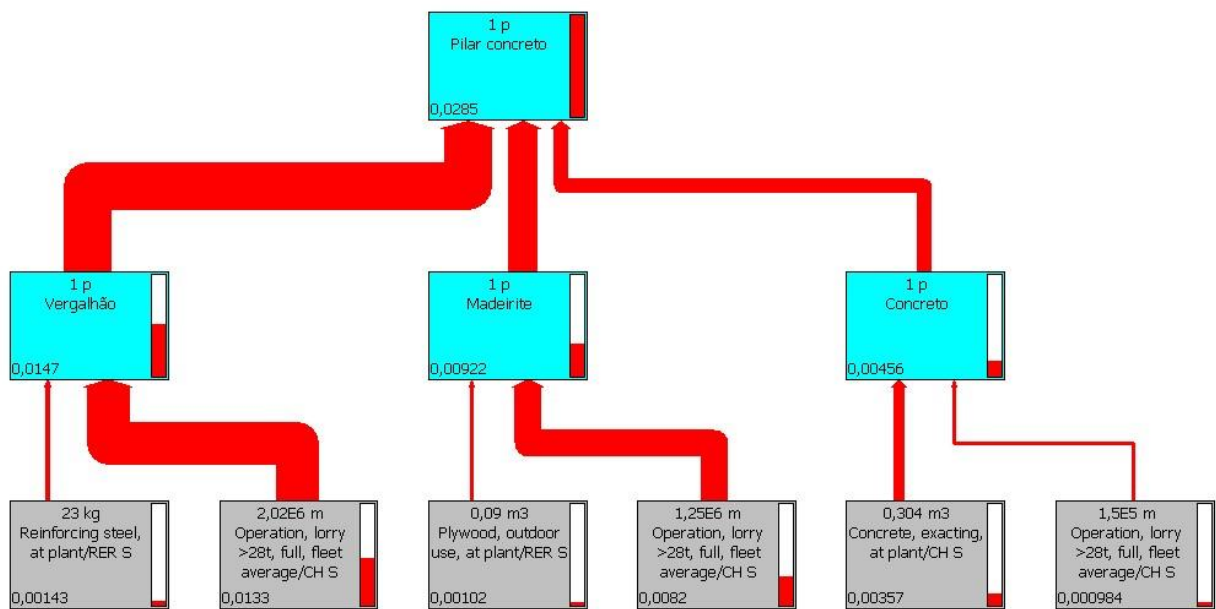


Figura 3.19 – Exemplo de rede de processo gerada pelo *software* Simapro (GARCIA, *et al.*, 2010).

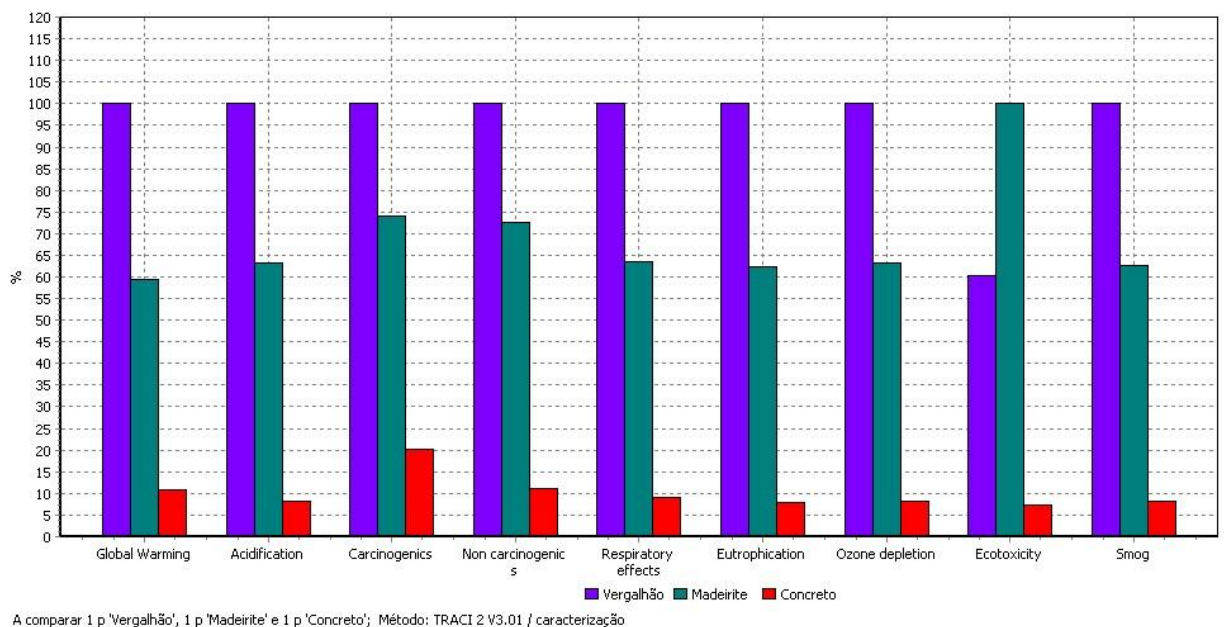


Figura 3.20 – Exemplo de gráfico gerado pelo *software* Simapro (GARCIA, *et al.*, 2010).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo definiu-se inicialmente que a unidade funcional a ser avaliada seria a envoltória de uma edificação que promove determinado conforto térmico. A partir desta premissa o trabalho se desenvolveu em dois momentos. O primeiro refere-se a avaliação do desempenho térmico das envoltórias e o segundo corresponde a análise dos impactos ambientais. O contexto geral desta pesquisa é apresentado na Figura 4.1 e as etapas são detalhadas a seguir.

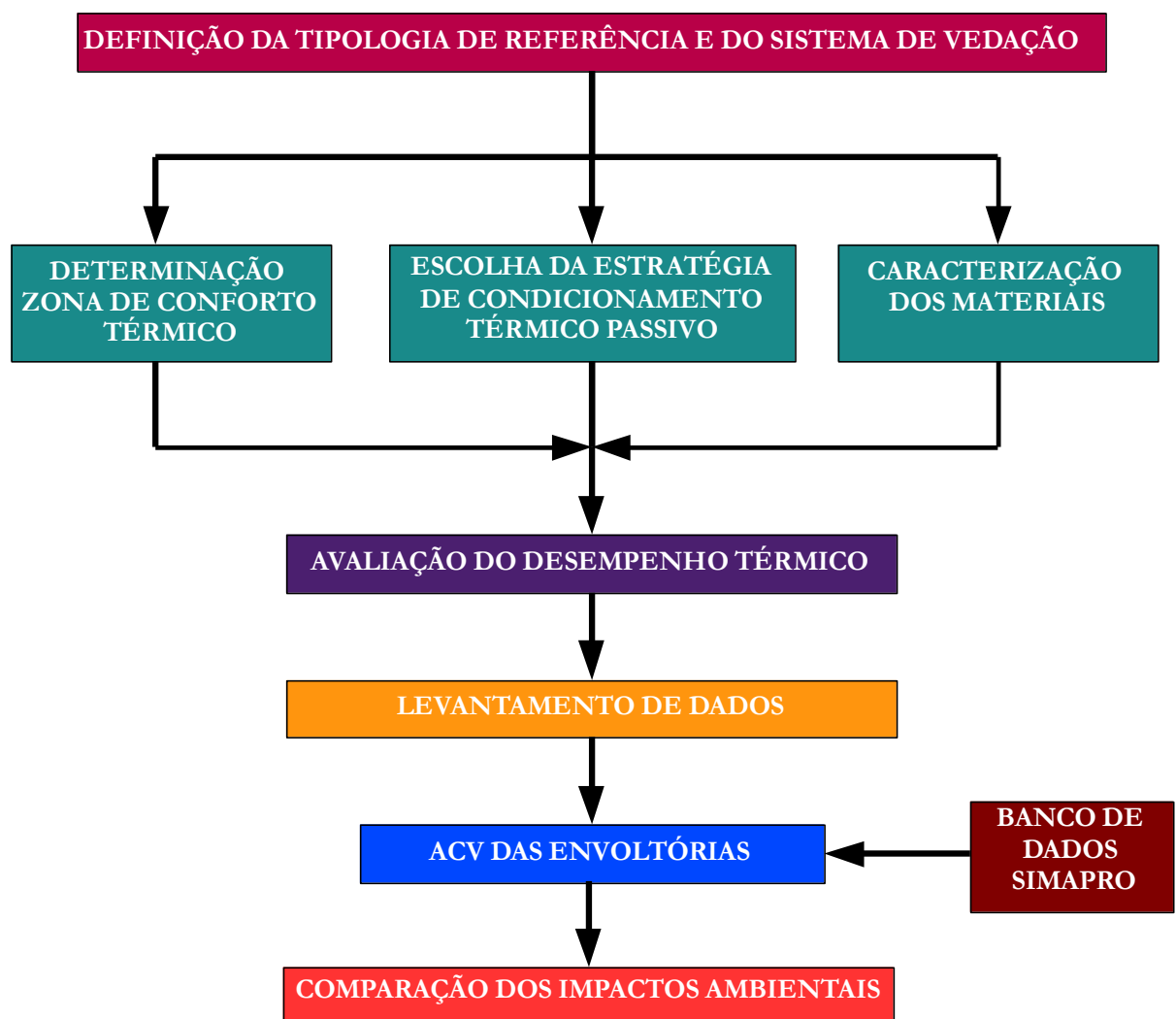


Figura 4.1 – Etapas do Trabalho

4.1. Definição da Tipologia de Referência e Sistemas de Vedação

O objeto de estudo desta pesquisa é uma tipologia residencial unifamiliar com aproximadamente 42 m² de área, seguindo os parâmetros do projeto padrão de casas populares da Caixa Econômica Federal normalmente executado em programas sociais, com: sala, dois quartos, banheiro e cozinha (Figura 4.2).

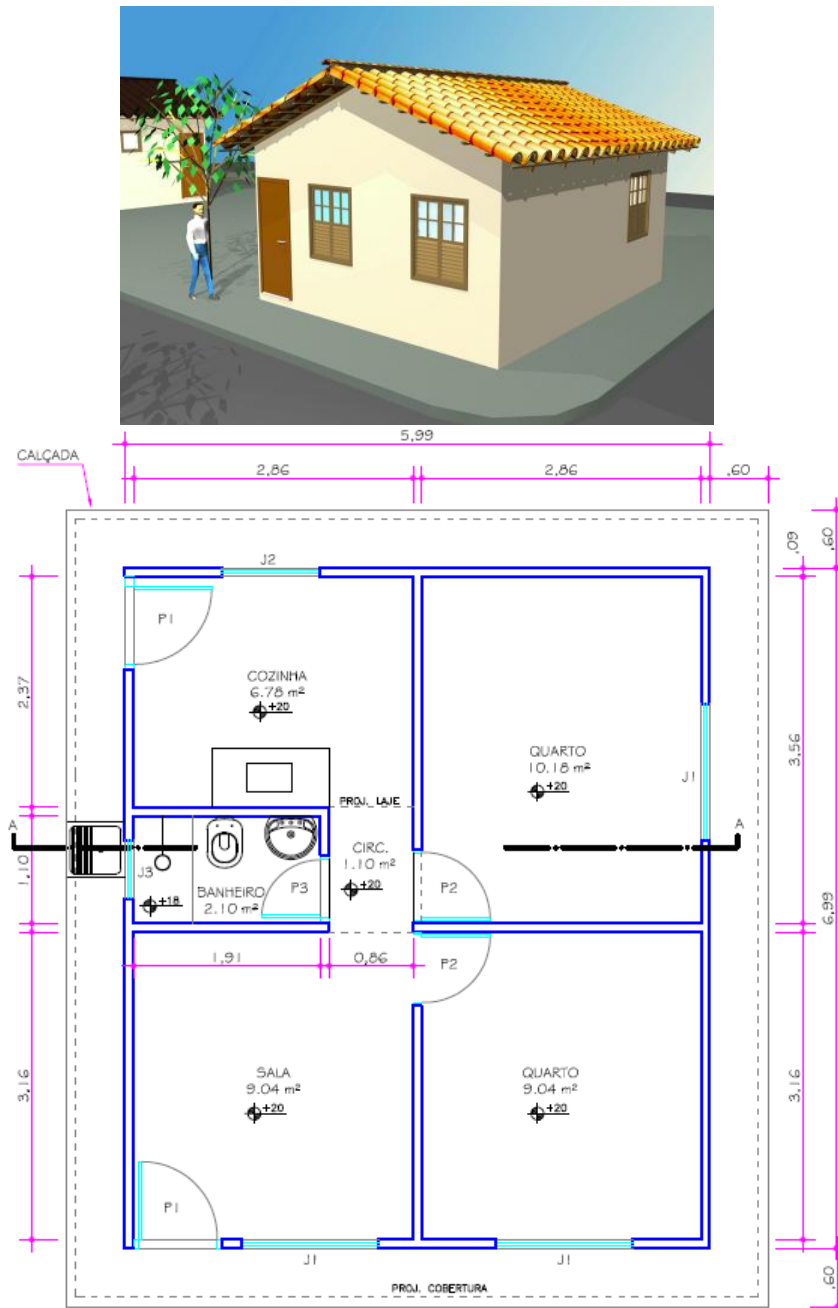


Figura 4.2– Perspectiva e Planta Baixa Projeto Padrão Caixa (CADERNOS CAIXA, 2007)

Utilizando-se a proposta arquitetônica, especificações e métodos construtivos sugeridos, optou-se por analisar envoltórias compostas por painéis de blocos de diferentes naturezas (concreto ou

cerâmico) e largas. A escolha desse sistema de vedação externa partiu da observação do conjunto de edificações comumente executadas nos programas de habitação popular em Minas Gerais.

4.2. Determinação da Zona de Conforto

Para a avaliação do desempenho térmico das envoltórias, através da simulação computacional, foi necessário a determinação da zona de conforto. A definição desta zona se deu através dos limites térmicos estabelecidos pelo Diagrama Bioclimático de Givoni para países com clima quente e em desenvolvimento (item 3.2.2.1). Tal carta bioclimática, onde são identificadas as zonas, foi gerada pelo *software* Analysis Bio 2.1.5 e adaptada de acordo com a Norma 15220-3 (2005). A análise foi realizada a partir da inserção de dados climatológicos mensais da cidade de Belo Horizonte recolhidos pelo Laboratório de Conforto Térmico e Eficiência Energética da Escola de Arquitetura da UFMG (LABCON) e da utilização do banco de dados oferecido pela ferramenta computacional para a cidade de Belo Horizonte .

4.3. Escolha da Estratégia de Condicionamento Térmico Passivo

A escolha da estratégia utilizada baseou-se nas recomendações da norma NBR 15220-3 (2005). Para se certificar de que as estratégias indicadas atendem as particularidades do local em estudo, foi realizada, posteriormente, uma análise da carta bioclimática adaptada de Givoni. Conforme a NBR 15220-3 (2005), a cidade de Belo Horizonte, está inserida na zona bioclimática 3. A norma recomenda estratégias de condicionamento térmico gerais para a zona, conforme visualizado na figura 4.3 gerada pelo *software* ZBBR 1.1 e específicas para os climas.

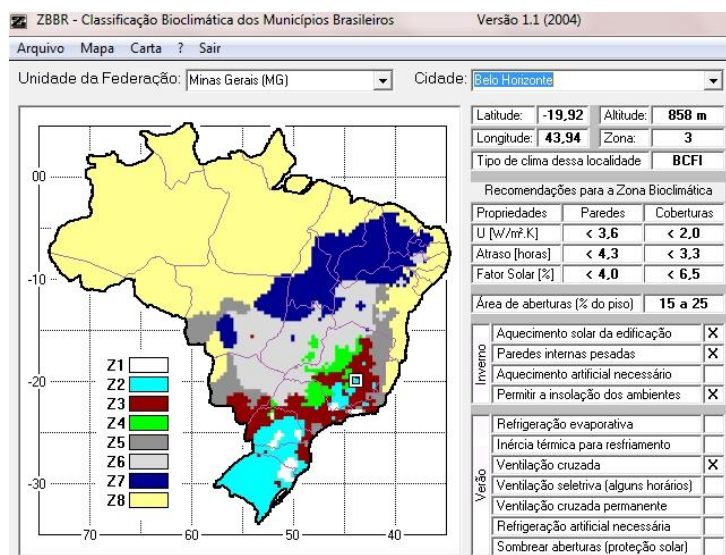


Figura 4.3- Recomendações para Zona Bioclimática 3 (ZBBR, 2004)

Para a cidade de Belo Horizonte, que possui clima tropical de altitude, a norma NBR 15220-3 (2005) propõe as estratégias de condicionamento térmico passivo B,C,Fe I, detalhadas conforme a tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico (NBR 15220, 2005).

Estratégia	Detalhamento
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.

Como o objetivo do trabalho é avaliação de materiais, determinou-se que a tipologia de referência apresentava, em todas as análises, implantação e orientação idênticas, a mesma área efetiva útil de aberturas para ventilação além da cor externa igual para os componentes, optando-se por verificar somente as estratégias relacionadas a variação da massa térmica do material da envoltória, para resfriamento e aquecimento. Tal estratégia foi aplicada neste estudo através da variação da espessura dos componentes construtivos.

Segundo AKUTSU (2010), a quantidade de massa térmica é que confere a uma edificação maior inércia térmica, ou seja, paredes de maior espessura (AECWEB, 2011). O conceito de massa térmica refere-se a combinação da densidade e da espessura do material. A massa térmica das edificações pode estar contida em paredes, partições internas, pisos, coberturas, desde que constituídos de material com grande capacidade térmica como concreto, tijolos, telhas, etc (PAPST,1999).

4.4. Caracterização dos Materiais

Foram analisados blocos cerâmicos e de concreto, com furações verticais, de igual comprimento e diferentes larguras. A classificação dos blocos como estrutural foi atribuída em função do seu

dimensionamento, conforme as normas da ABNT NBR 15270-2 (2005) e NBR 6163 (2003). Esses componentes construtivos foram escolhidos em função de sua disponibilidade no mercado de Belo Horizonte, Minas Gerais, e as amostras para análise foram fornecidas pelos fabricantes. A caracterização física dos blocos se deu através da determinação de suas dimensões e volume de seus vazios. A composição química dos materiais foi estabelecida a partir de dados fornecidos por fabricantes através de contato pessoal.

As propriedades dos materiais necessárias para a avaliação do desempenho térmico por prescrição, densidade e condutividade térmica, foram determinadas no laboratório, respectivamente, através da verificação da massa e volume (deslocamento da água) e do método de pulso de energia. As características referentes ao reboco e a argamassa de assentamento foram retiradas da norma NBR 15220-2 (2005). As massas dos blocos foram determinadas a partir da densidade e do volume.

4.5. Avaliação do Desempenho Térmico das Envoltórias

Os desempenhos térmicos das envoltórias foram avaliados por prescrição, determinando-se as propriedades térmicas dos componentes construtivos e por desempenho, através de simulação computacional utilizando-se o *software* Arquitrop® 3.0.

4.5.1. Avaliação por Prescrição

A avaliação do desempenho térmico por prescrição foi feita determinando-se os valores de resistência (R), transmitância (U), atraso térmico (φ), fator de ganho de calor solar (FS_o) e comparando-os com os parâmetros térmicos referentes a vedações externas, recomendados na NBR15220-3 (2005) apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Transmitância Térmica, atraso térmico e fator de calor solar para cada tipo de vedação externa (NBR 15220, 2005).

Vedações Externas	Transmitância Térmica - U (W/m ² .K)	Atraso Térmico - φ Horas	Fator Solar - FS _o %
Leve	$U \leq 3,00$	$\varphi \leq 4,3$	FS _o $\leq 5,0$
Leve Refletora	$U \leq 3,60$	$\varphi \leq 4,3$	FS _o $\leq 4,0$
Pesada	$U \leq 2,20$	$\varphi \leq 6,5$	FS _o $\leq 3,0$

Para determinar as resistências térmicas, utilizou-se o método de cálculo da transmitância térmica. O cálculo foi baseado nas equações descritas na NBR15220-2 (2005), que considera a camada de ar dentro dos blocos e as diferenças de espessura de material sólido ao longo do comprimento do

bloco, sendo, portanto uma condução entre camadas homogêneas e não homogêneas de material perpendiculares ao fluxo de calor. Por definição, resistência térmica, R , é dado pela expressão 4.1:

$$R = e / \lambda \quad (4.1)$$

Onde: e é a espessura da parede em metros; λ é a condutividade térmica do material, em W/mK.







A resistência térmica ambiente a ambiente, R_T , ou seja, do ambiente externo da parede até o ambiente interno da edificação, é dado pela expressão 4.2:

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (4.2)$$

Onde: R_{se} e R_{si} são as resistências superficiais externa e interna e R_t é a resistência térmica de superfície a superfície.

Os valores das resistências superficiais externa e interna recomendados pela norma NBR15220-2 (2005) são dados pela tabela 4.3. Sabendo-se que o fluxo é na horizontal, considerou-se $R_{se}=0,04$ e $R_{si}=0,13$.

Tabela 4.3 – Resistência térmica superficial interna e externa (NBR 15220, 2005).

R _{si} (m ² .K/W)			R _{se} (m ² .K/W)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

A resistência térmica total de superfície a superfície, R_t , de um bloco plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, conforme figura 4.4, é dado pela expressão 4.3:

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (4.3)$$

Onde: R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de superfície a superfície para cada seção (a,b,...,n); A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção.

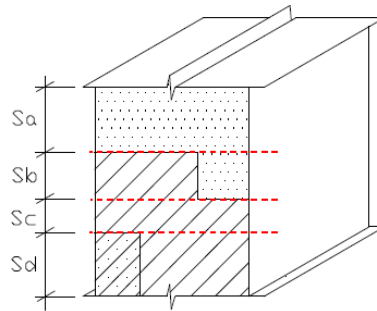


Figura 4.4- Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas (NBR15220, 2005)

A resistência térmica de superfície a superfície para cada seção, R_n , é o somatório das resistências das n camadas homogêneas e câmaras de ar que a compõe determinada pela expressão 4.4:

$$R_n = R_{t1}, R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1}, R_{ar2} + \dots + R_{arn} \quad (4.4)$$




Onde: $R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{tn}$ são as resistências das n camadas homogêneas; $R_{ar1}, R_{ar2}, \dots, R_{arn}$ são resistências das câmaras de ar.

Para as câmaras de ar dentro dos blocos, que são camadas de ar não ventiladas, a resistência térmica do ar irá variar conforme a emissividade da parede, de acordo com a tabela 4.4, a espessura da camada e a direção do fluxo, conforme mostrado na tabela 4.5. Desta forma, sendo as superfícies de alta emissividade, as resistências térmicas do ar consideradas foram de 0,14 e 0,16 $m^2.K/W$ dependendo da espessura da camada de ar.

Tabela 4.4 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiações a temperaturas comuns (ondas longas) (NBR15220, 2005).

Tipo de Superfície	α	ϵ
Chapa de Alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de Alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25	0,05
Caiação nova	0,12/0,15	0,90
Concreto aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Telha de Barro	0,75/0,80	0,85/0,95
Tijolo Aparente	0,65/0,80	0,85/0,95
Reboco Claro	0,30/0,50	0,85/0,95
Revestimento Asfáltico	0,85/0,98	0,90/0,98
Vidro Incolor	0,06/0,25	0,84
Pintura Branca	0,20	0,90

Tabela 4.5 – Resistência térmica de camadas de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura (NBR15220, 2005).

Natureza da superfície da camada de ar	Espessura “e” da camada de ar (cm)	Resistência térmica, R_{ar} ($m^2 \cdot K/W$)		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal 	Ascendente 	Descendente 
Superfície de alta emissividade $\epsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\epsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

As determinações das outras propriedades térmicas como, transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator de ganho solar também basearam-se nos métodos de cálculo descritos na NBR15220-2 (2005).

A transmitância térmica, U , é o inverso da resistência térmica total, R_T , conforme expressão 4.5:

$$U = 1/R_T \quad (4.5)$$

Onde: U é a transmitância térmica de componentes; R_T é resistência térmica total.

A capacidade térmica, C_T , de componentes é determinada conforme a expressão 4.6:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (4.6)$$

Onde: λ é a condutividade térmica do material da camada i^a ; R é a resistência térmica da camada i^a ; e é a espessura da camada i^a . c é o calor específico do material da camada i^a ; ρ é a densidade de massa aparente do material da camada i^a .

A capacidade térmica, C_T , de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela expressão 4.7:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (4.7)$$

Onde: C_{Ta} , C_{Tb} , ..., C_{Tn} são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão anterior e A_a , A_b , ..., A_n são as áreas de cada seção.

O atraso térmico, φ , de um componente formado por diferentes materiais superpostos em “n” camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), varia conforme a ordem das camadas e é determinado pela expressão 4.8:

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \sqrt{B_1 + B_2} \quad (4.8)$$

Onde: R_t é a resistência térmica de superfície a superfície do componente; B_1 é dado pela expressão 4.9 e B_2 é determinado pela expressão 4.11.

$$B_1 = 0,226 \frac{B_0}{R_t} \quad (4.9)$$

Onde: R_t é a resistência térmica de superfície a superfície do componente; B_0 é dado pela expressão 4.10.

$$B_0 = C_T - C_{Text} \quad (4.10)$$

Onde: C_T é a capacidade térmica total do componente; C_{ext} é a capacidade térmica externa do componente.

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) \quad (4.11)$$

Onde: λ é a condutividade térmica do material; c é o calor específico do material; ρ é a densidade de massa aparente do material; R_t é a resistência térmica; R_{tex} é a resistência térmica da face externa.

O fator de ganho de calor solar de elementos opacos, FS_o , admitindo R_{se} constante e igual a 0,04 é dado pela expressão 4.12:

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha \quad (4.12)$$

Onde: FS_o é o fator solar de elementos opacos em percentagem; U é a transmitância térmica do componente; α é a absorvância à radiação solar (Tabela 4.4).

Foram calculadas as propriedades térmicas para todos os sistemas de vedação considerando as dimensões dos blocos de concreto e cerâmicos pré-estabelecidas e reboco em ambas as faces de 2 cm de espessura. A avaliação do desempenho foi realizada comparando-se os valores determinados de transmitância térmica, atraso térmico e fator de ganho solar com os parâmetros estipulados pela norma e apresentados na tabela 4.2. Considerou-se que as envoltórias que apresentaram propriedades térmicas mais próximas dos parâmetros de vedações externas pesadas, atendendo a estratégia de condicionamento térmico adotada, apresentariam melhor desempenho térmico.

Para este trabalho, admitiu-se que envoltórias de mesma resistência térmica apresentam desempenhos térmicos similares. Tal premissa foi baseada no fato de que os parâmetros para verificação do desempenho térmico, fornecidos pela NBR15220-3 (2005), como transmitância, atraso térmico e fator de ganho de calor solar, dependem fortemente do valor da resistência térmica da parede. Desta forma, posteriormente, alguns valores de resistência térmica foram tomados como referência e as envoltórias que apresentaram resistências térmicas mais próximas, tiveram a espessura do seu reboco modificada para que, após submetidas ao mesmo cálculo, apresentassem desempenhos térmico similares.

4.5.2. Avaliação por Desempenho

Para a avaliação por desempenho utilizou-se o *software* Arquitrop[®] 3.0, desenvolvido pela UFSCar. Analisou-se as frequências das temperaturas internas dentro da zona de conforto de Givoni, comparou-se a variação da temperatura (temperatura externa – temperatura interna) e os ganhos de calor através das fachadas da tipologia durante os mesmos dias do ano. Desta forma, a envoltória que proporcionou maior quantidade de horas dentro da zona de conforto térmico e as menores temperaturas internas além de apresentar ganhos de calor inferiores no verão, possui melhor desempenho térmico.

A simulação foi realizada de forma a validar a avaliação por prescrição, uma vez que muitos dados utilizados foram retirados da norma NBR 15220 (2005) e experimentais. O *software* Arquitrop[®] 3.0, possui em seu banco de dados os climas das principais cidades brasileiras além de materiais e componentes usualmente empregados na construção civil. No entanto, antes de se realizar as simulações, foi necessário fornecer dados quanto ao ano climático da cidade em estudo provenientes do TRY (item 3.2.2). Trata-se de uma ferramenta computacional que possui

algumas limitações. No entanto, tais deficiências foram identificadas e contornadas, não interferindo de maneira significativa na verificação da avaliação do desempenho térmico.

As habitações modeladas se diferenciam somente pela natureza dos blocos presentes nas envoltórias adotadas neste trabalho. Simulou-se o comportamento das tipologias nos dias 21 de junho, solstício de inverno; 22 de dezembro, solstício de verão. Os dias de solstício foram escolhidos por serem os dias do ano que possuem os limites de inclinação solar.

As habitações foram simuladas conforme as características da tipologia de referência no que refere ao sistema construtivo empregado e a implantação ao longo do lote conforme figura 4.5.

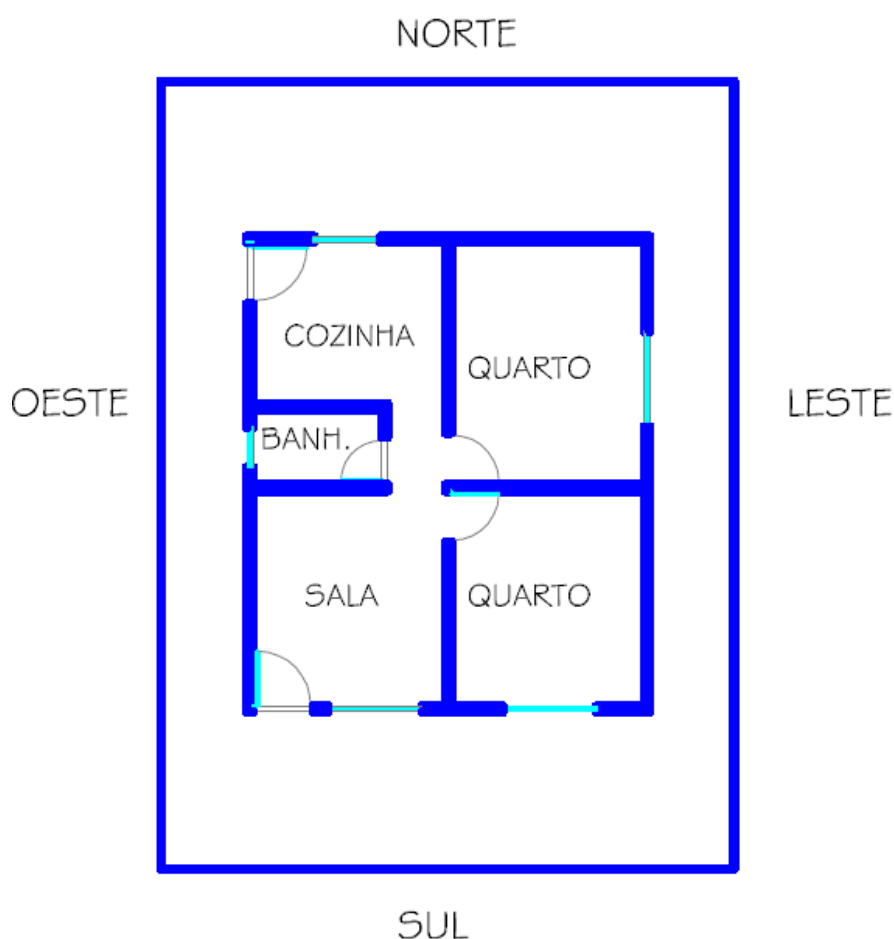


Figura 4.5 – Implantação Projeto Padrão Caixa (CADERNOS CAIXA, 2007)

Os dados referentes às dimensões da habitação, orientação solar a partir das normais das fachadas, cores, áreas de ventilação e iluminação, proteção solar das janelas, constituição do piso, paredes e cobertura, foram inseridos no *software* Arquitrop[®] 3.0. O dado relacionado ao período de ventilação está de acordo a um padrão adotado baseado na observação do cotidiano de uma família convencional da classe de baixa renda e não com a realidade. Na tabela 4.6, estão descritos

os dados que foram introduzidos no processo de simulação de acordo com as informações fornecidas pelo projeto padrão da Caixa que caracterizam a tipologia tomada como referência.

Tabela 4.6 – Dados da tipologia de referência inseridos no *software* Arqutrop® 3.0

Característica	Dado
Pé direito	2,60m
Pavimentos	1
Cor cobertura	Média Escura
Cor fachada	Clara (branco)
Área de Ventilação	6,90 m ²
Área Vidros	7,08m ²
Espessura dos vidros e proteção solar	0,005m, sem proteção
Piso	Cimentado Liso
Paredes Internas	Bloco concreto
Cobertura	Telha de Barro com forro de PVC
Período de Ventilação	Início - 18:00hs Duração - 16 hs

4.6. Levantamento de Dados

A partir do conhecimento de quais envoltórias apresentariam comportamentos térmicos parecidos, através da avaliação do desempenho térmico por prescrição, foi possível quantificar os materiais a serem utilizados nas envoltórias de naturezas diferentes, com desempenhos térmicos similares.

Também foram levantados dados referentes à fase de produção dos blocos como: composição dos blocos, tipo e origem da matéria-prima, gastos de energia durante a fabricação. Estas informações foram coletadas junto aos fornecedores.

Em relação ao consumo de matéria-prima, combustível e emissões de poluentes referentes a fabricação do reboco, que normalmente é realizada na própria obra e manualmente, foram considerados traços comumente utilizados em obras e as fontes de recursos (jazida de calcário, pedreiras, cimenteira, etc.) mais próximas da região da Pampulha para cálculo dos transportes das matérias-primas.

4.7. Análise do Ciclo de Vida das Envoltórias

A avaliação do ciclo de vida das envoltórias foi feita com base na norma da ABNT NBR ISO 14044 (2009): definiu-se o objetivo e o escopo, fez-se o inventário, a avaliação do impacto ambiental e interpretou-se os resultados.

Durante a primeira fase, definição do objetivo e escopo, o propósito do estudo e sua amplitude foram definidos. Na fase de Análise de Inventário, as informações sobre o produto foram levantadas e as entradas e as saídas consideradas relevantes para o sistema foram quantificadas. Executado com o auxílio do *software* Simapro[®], o inventário foi realizado em duas etapas. Primeiramente, os processos inventariados foram as produções de 1kg de bloco de concreto, 1kg de bloco cerâmico e 1kg de reboco, considerou-se as matérias-primas e energia para a fabricação e o transporte dos mesmos até a fábrica de blocos e no caso do reboco até a obra. Na segunda etapa, referente ao inventário do produto, os dados de entrada foram: a massa de blocos e reboco a serem utilizadas em toda a envoltória do projeto de referência e o transporte da fábrica até a obra. Por falta de dados específicos não considerou-se as emissões e a geração de resíduos durante a fabricação dos blocos e montagem da envoltória. Também, devido a indisponibilidade de dados nacionais e em função do objetivo do trabalho, optou-se por utilizar dados estrangeiros referentes aos consumos e emissões, resultantes da atividade de produção e extração de matéria prima, adotando-se as bases de dados Ecoinvent v2.0 , IDEMAT 2001 e ETH-ESU 96, disponíveis no *software* SimaPro. Tais dados, apesar de não corresponderem a realidade nacional, apresentam os processos que mais se aproximam dos realizados no Brasil e permitem que se visualize a importância da definição da unidade funcional.

A etapa referente a avaliação de impacto ambiental foi realizada com o auxílio do *software* SimaPro, utilizou-se o método Eco-indicator 99 v2.05. Nesta fase, os materiais foram examinados sob uma perspectiva ambiental, relacionando-se os resultados do inventário às categorias de impacto e transformando-os em resultados dos indicadores de categorias, ou ainda, em um índice ambiental único por sistema de produto avaliado. O conjunto de resultados dos indicadores constituiu o perfil da AICV (Análise do Impacto do Ciclo de Vida), fornecendo informações relativas às questões ambientais associadas aos itens de entrada e saída do sistema.

Para finalizar o estudo de ACV, foi preciso realizar a análise e interpretação de todas as constatações e resultados da AICV, confrontando-os com os objetivos e escopo estabelecidos, o que possibilitou alcançar conclusões e recomendações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos Materiais

As propriedades dos materiais utilizados nas envoltórias determinadas em laboratório e dadas pela norma NBR15220-2 (2005) são apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Propriedades dos materiais determinadas em laboratórios e dadas pela NBR15220-2 (2005).

Material	Condutividade (W/(m.k))		Densidade (kg/m ³)	
	Laboratório	Norma	Laboratório	Norma
Concreto	1,8	1,75	2300	2200 - 2400
Cerâmica	0,7	0,7 - 0,9	1300	1300 - 1600
Reboco	-	1,15	-	2000
Argamassa	-	1,15	-	2000

Observa-se que os valores experimentais referentes ao concreto e a cerâmica são coerentes com os relatados na norma NBR15220-2 (2005).

Os resultados da análise dimensional dos blocos de concreto analisados são apresentados na figura 5.1. O bloco de 9cm de largura tem 5cm de espessura de câmara de ar, o de 14cm tem 10cm e o de 19cm tem 15cm.

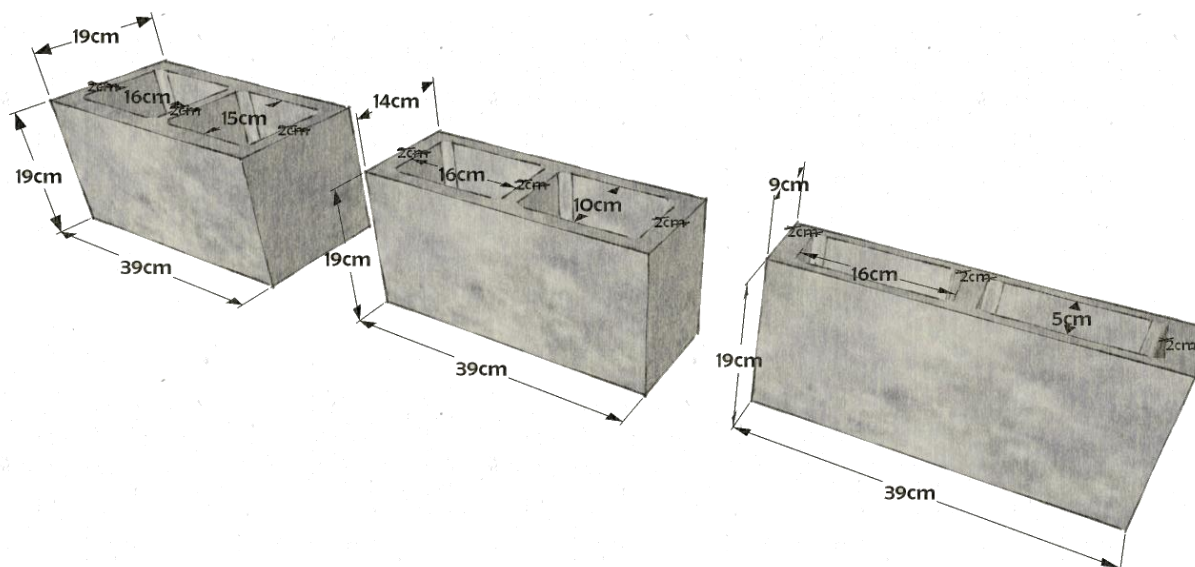


Figura 5.1 – Dimensões consideradas do bloco de concreto

Os blocos cerâmicos, ao contrário dos blocos de concreto, apresentam variação da geometria interna. As dimensões obtidas para os blocos cerâmicos são mostradas na figura 5.2.

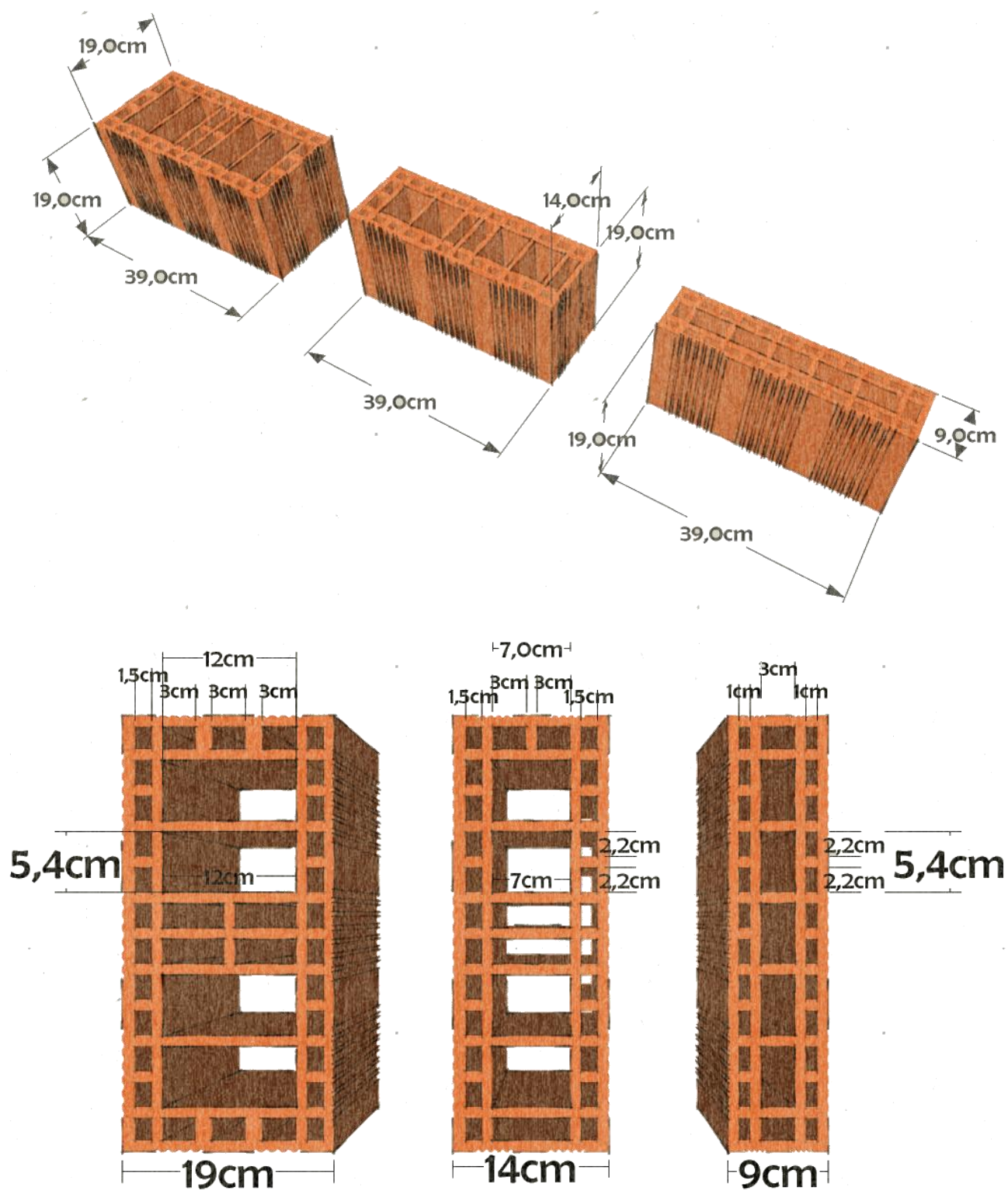


Figura 5.2 – Dimensões consideradas do bloco cerâmico

Conforme as especificações das normas da ABNT NBR 15270-2 (2005) e NBR 6163 (2003) que tratam, respectivamente, da caracterização de blocos cerâmicos e bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural, os componentes que apresentam as dimensões 9 x 19 x 39 cm não apresentam função estrutural. No entanto, foi considerado o mesmo processo construtivo para todas as envoltórias por se tratar de uma tipologia de pavimento único, implantada no nível do solo, não exigindo nenhum tipo de reforço estrutural.

A tabela 5.2 sintetiza as caracterizações geométricas ilustradas nas figuras 5.1 e 5.2 e apresenta os resultados obtidos referentes as massas dos blocos determinadas em laboratório.

Tabela 5.2 – Características dos Blocos.

Material	Espessura (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Massa Laboratório (kg)
Bloco Cerâmico	9	19	39	5,03
Bloco Cerâmico	14	19	39	6,38
Bloco Cerâmico	19	19	39	7,88
Bloco de Concreto	9	19	39	8,13
Bloco de Concreto	14	19	39	9,44
Bloco de Concreto	19	19	39	10,75

Os resultados indicam que os blocos de concreto apresentam maior massa que os blocos cerâmicos, ou seja, incorporam maior quantidade de materiais para uma mesma família de blocos.

5.2. Determinação da Zona de Conforto e Estratégias Bioclimáticas

A zona de conforto determinada para o estudo é a proposta por Givoni, na qual a sensação de conforto térmico pode ser obtida para umidade relativa variando de 20 a 80% e temperatura entre 18°C e 29°C. A zona de conforto está ilustrada no diagrama original de Givoni na figura 5.3 gerado pelo *software* Analysis Bio 2.1.5.

A verificação da escolha da estratégia de condicionamento térmico mais pertinente para o objeto desta pesquisa foi realizada através das análises do Diagrama de Givoni original, figura 5.3 e o Diagrama de Givoni adaptado por Roriz, *et al.* (1999) com a finalidade de tornar o método mais sensível à realidade climática brasileira, figura 5.4.

As normais climatológicas da cidade de Belo Horizonte, plotadas no diagrama original de Givoni, da figura 5.3, indicam que, durante todo o ano, temperaturas internas mais agradáveis podem ser obtidas através do uso de componentes construtivos com maior massa térmica. Nos meses de

abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro, a massa térmica superior auxiliaria no aquecimento da edificação e nos meses de janeiro, fevereiro e março, seriam responsáveis pelo resfriamento, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.

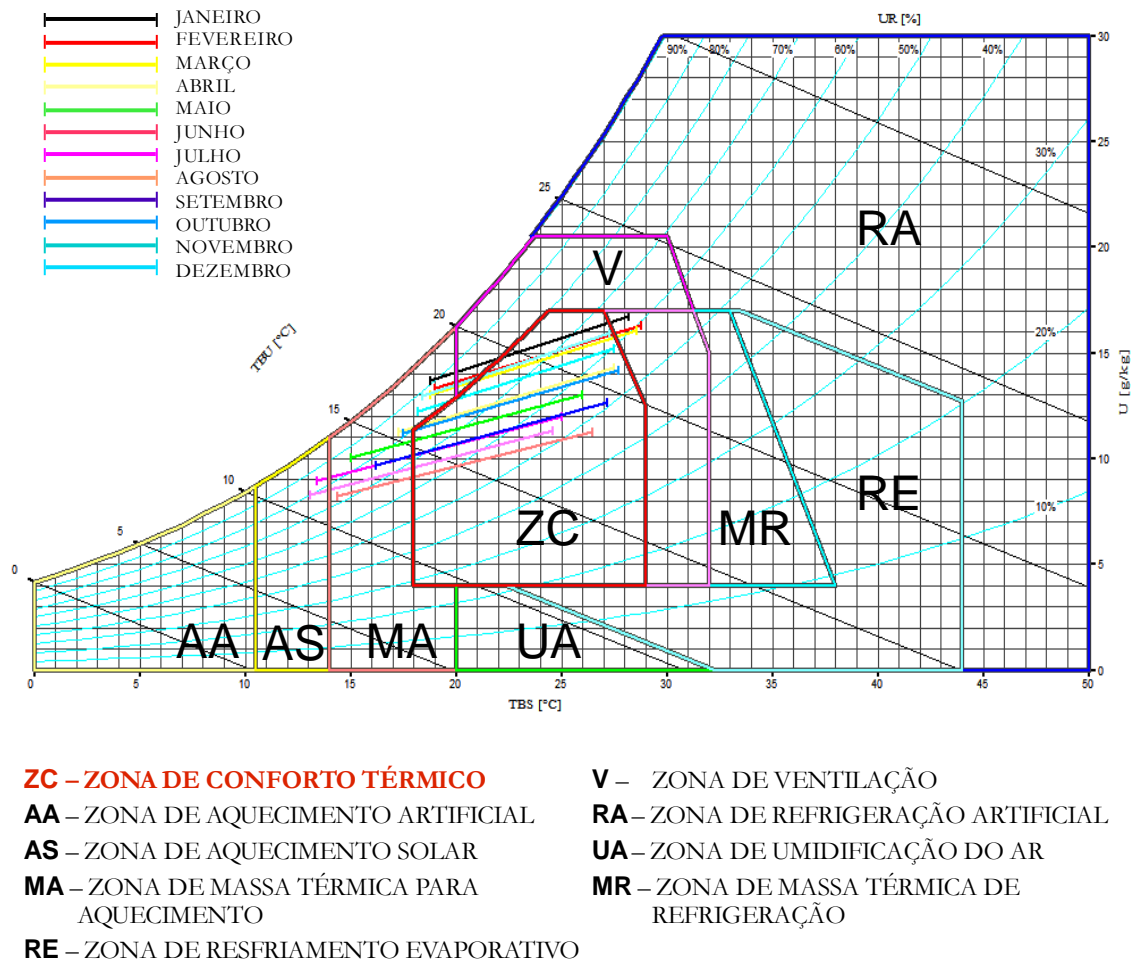


Figura 5.3 – Diagrama de Givoni para cidade de Belo Horizonte (ANALYSIS BIO 2.1.5, 2011)

A importância da utilização da estratégia que propõe paredes e coberturas de maior massa térmica para melhorar o desempenho térmico da edificação, fica mais evidente no diagrama adaptado de Givoni. A figura 5.4 apresenta o diagrama adaptado, cada reta inteira equivale a 100% do tempo analisado (um mês) e os seus segmentos indicam as porcentagens de horas correspondentes a cada uma das estratégias ao longo de um ano. A porcentagem de horas e distribuição das normais climatológicas predominantemente nas zonas F, C e I, zona de desumidificação, zona de massa térmica para aquecimento e zona de massa térmica para

refrigeração, respectivamente, indicam a importância da utilização de vedações mais pesadas. Este resultado corrobora a escolha da estratégia de condicionamento passivo da pesquisa.

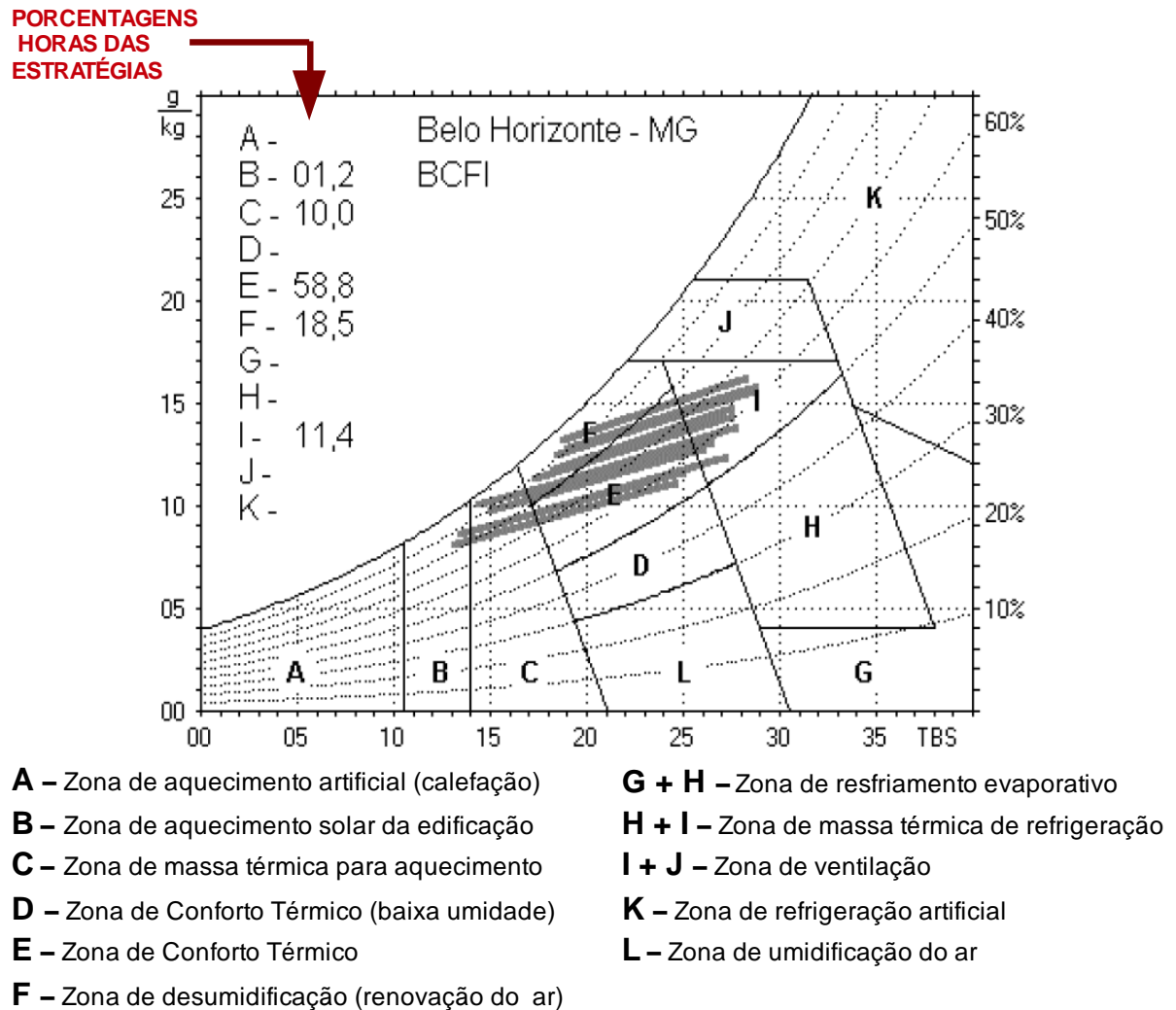


Figura 5.4 – Diagrama adaptado de Givoni para cidade de Belo Horizonte (RORIZ, *et al.*, 1999)

5.3. Avaliação do Desempenho Térmico das Envoltórias

5.3.1. Avaliação por prescrição

Foram determinadas as resistências térmicas dos seis blocos e dos sistemas (reboco + bloco + argamassa) denominados paredes e ilustrados na figura 5.5. As resistências térmicas dos blocos e das paredes, apresentadas na tabela 5.3, foram calculadas pela expressão 4.2 considerando os valores da tabela 5.1 e fluxo horizontal adotando-se $R_{se}=0,04$ e $R_{si}=0,13$ (tabela 4.3).

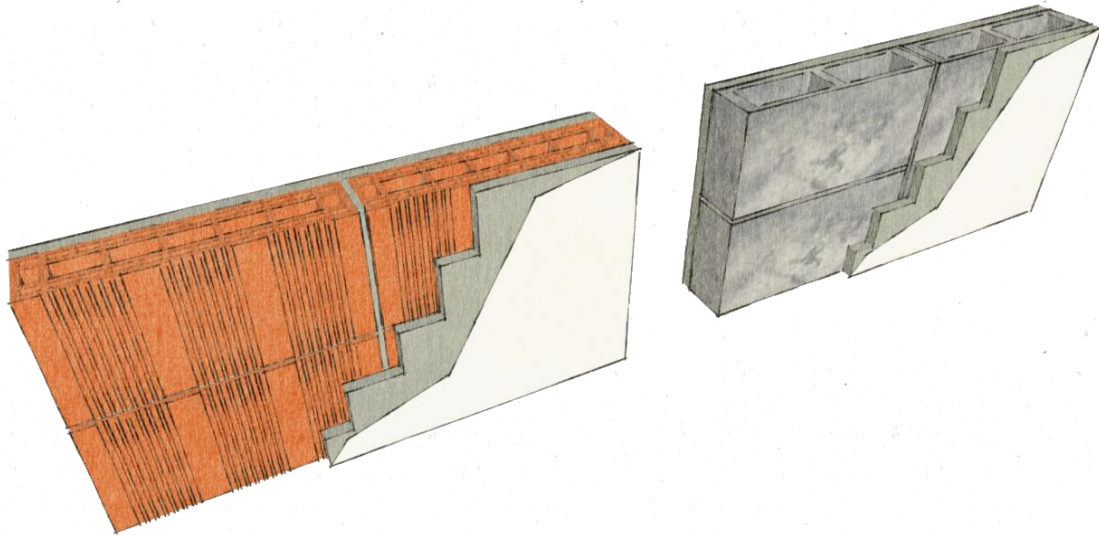


Figura 5.5 – Paredes de blocos cerâmicos e de concreto

Tabela 5.3 – Resistência térmica dos blocos e de paredes com 2cm de reboco.

Material	Largura (cm)	Espessura do Reboco	Resistência Térmica (m ² .K/W)
Bloco Cerâmico	9	-	0,229
Bloco Cerâmico	14	-	0,311
Bloco Cerâmico	19	-	0,359
Parede de Blocos Cerâmicos	9	2 cm em ambas as faces	0,410
Parede de Blocos Cerâmicos	14	2 cm em ambas as faces	0,487
Parede de Blocos Cerâmicos	19	2 cm em ambas as faces	0,538
Bloco de Concreto	9	-	0,131
Bloco de Concreto	14	-	0,158
Bloco de Concreto	19	-	0,172
Parede de Blocos de Concreto	9	2 cm em ambas as faces	0,330
Parede de Blocos de Concreto	14	2 cm em ambas as faces	0,360
Parede de Blocos de Concreto	19	2 cm em ambas as faces	0,377

Os resultados indicam que as resistências térmicas dos blocos e paredes de blocos cerâmicos, apresentaram valores superiores quando comparadas aos obtidos para os blocos e paredes de blocos de concreto.

Os valores de transmitância térmica (U) foram determinados pela expressão 4.5. O fator de ganho de calor solar (FS_o) foi obtido pela expressão 4.12 considerando a pintura das paredes externas na cor branca ($\alpha = 0,2$), conforme tabela 4.4. O cálculo do atraso térmico, através da expressão 4.8, foi precedido pelo da capacidade térmica utilizando-se a expressão 4.7. Os resultados são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Transmitância térmica, atraso térmico e fator de ganho solar para as paredes.

Material	Largura (cm)	Espessura do Reboco	Transmitância Térmica - U (W/m ² .K)	Atraso Térmico - φ (Horas)	Fator Solar - FS _o (%)
Parede de Blocos Cerâmicos	9	2 cm	2,44	3,6	1,95%
Parede de Blocos Cerâmicos	14	2 cm	2,05	4,2	1,64%
Parede de Blocos Cerâmicos	19	2 cm	1,86	4,7	1,48%
Parede de Blocos de Concreto	9	2 cm	3,03	3,3	2,42%
Parede de Blocos de Concreto	14	2 cm	2,78	3,6	2,22%
Parede de Blocos de Concreto	19	2 cm	2,65	3,8	2,12%

Os resultados conferem com os valores determinados, para as mesmas envoltórias, pelo *software* Transmitância (LABEEE, 2002), ferramenta computacional desenvolvida para auxiliar no cálculo de propriedades térmicas de componentes construtivos baseada na NBR 15220 (2005).

A comparação dos valores encontrados para transmitância térmica, atraso térmico e fator de ganho de calor solar, com os parâmetros recomendados pela NBR 15220 (2005), tabela 4.2, indicam que as paredes de blocos cerâmicos são mais pesadas. Portanto, a maior massa térmica confere a estas paredes um melhor desempenho térmico para a região em estudo.

Para a determinação de envoltórias com comportamentos térmicos similares, considerou-se, neste trabalho, que a resistência térmica seria suficiente para descrever o desempenho térmico. Baseou-se no fato de que os sistemas de vedação com mesma resistência térmica, absorvância para radiação solar referente a pintura das paredes externas (tabela 4.4) e área de exposição, apresentam valores referentes aos parâmetros de desempenho térmico (fator de ganho de calor solar, transmitância e atraso térmico) similares.

Portanto, considerou-se que as envoltórias que apresentassem a mesma resistência térmica possuíam desempenhos térmicos similares. As resistências das paredes de bloco cerâmico de 9cm e 14 cm de largura foram tomadas como referência (tabela 5.3). A partir dos valores apresentados na tabela 5.3, foram realizados cálculos para verificar qual deveria ser a espessura do reboco a ser aplicado em ambas as faces do bloco de concreto de 19cm para que o material obtivesse as resistências térmicas de referência. A parede em bloco de concreto de 19 cm foi escolhida por ter sido a envoltória que apresentou maior resistência térmica com este material. A tabela 5.5 apresenta as resistências térmicas calculadas para as paredes executadas com bloco de concreto de 19 cm e as espessuras de reboco necessárias para que obtivessem as resistências térmicas de referência.

Tabela 5.5 – Espessura do reboco em ambas as faces para paredes de blocos de concreto de 19cm com resistência térmica pré-estabelecida .

Material	Largura (cm)	Resistência Térmica (m².K/W)	Espessura do Reboco
Parede de Blocos de Concreto	19	0,410	4 cm em ambas as faces
Parede de Blocos de Concreto	19	0,487	8,35 cm em ambas as faces

5.3.2. Avaliação por desempenho

A análise do desempenho térmico baseou-se na comparação do comportamento de envoltórias de blocos cerâmicos e de blocos de concreto de mesmas dimensões. Os dados simulados no *software* Arqutrop[®] 3.0 foram plotados sob a forma de dois tipos de gráfico. Os gráficos de distribuição horária de temperatura de bulbo seco (TBS) no solstício de verão e no solstício de inverno apresentam as temperaturas internas e externas ao longo dos dias. Nos gráficos de distribuição do fluxo térmico, as cargas térmicas obtidas através dos meios opacos (alvenarias das fachadas e cobertura), das áreas envidraçadas e ventilação são apresentadas de hora em hora ao longo do período diurno e de duas em duas horas no período noturno. Desta forma, observa-se quais componentes construtivos proporcionam maior ou menor ganho de calor para a habitação e comparando-se o comportamento das envoltórias de blocos cerâmicos e a de blocos de concreto, qual apresenta melhor desempenho térmico.

Nos dois gráficos de distribuição horária de temperatura, figuras 5.6 e 5.7, observa-se que as habitações apresentam sempre temperaturas internas maiores em relação às externas. Este resultado assemelha-se com os descritos na literatura científica (BARBOSA, 1997; ASSIS, *et al.* 2007; MORENO, 2010). As temperaturas externas e internas variam de forma semelhante ao longo do dia. A partir do amanhecer elas aumentam, mantendo o mesmo comportamento até atingir o pico às 14:00hs no verão. No entanto, no inverno, a habitação com envoltória de blocos cerâmicos apresenta este pico um pouco antes. As temperaturas começam a decrescer as 17 hrs (entardecer). No verão, figura 5.6, a envoltória de blocos de concreto proporciona sempre maiores variações de temperatura, ou seja, temperaturas internas superiores as da habitação com vedação externa em blocos cerâmicos. Além disso, as temperaturas internas da tipologia com envoltórias de blocos de concreto, permanecem menor quantidade de horas dentro do limite máximo determinado pela zona de conforto, estipulado em 29 °C, ultrapassando este valor entre as 14:00hrs e 16:00 hrs. No inverno, figura 5.7, as habitações apresentam a mesma quantidade de

horas fora da zona de conforto e as temperaturas internas proporcionadas pelas envoltórias de bloco de concreto são superiores durante todo o dia. Durante o período de 9:00 até 0:00 hr as duas habitações encontram-se dentro da zona de conforto.

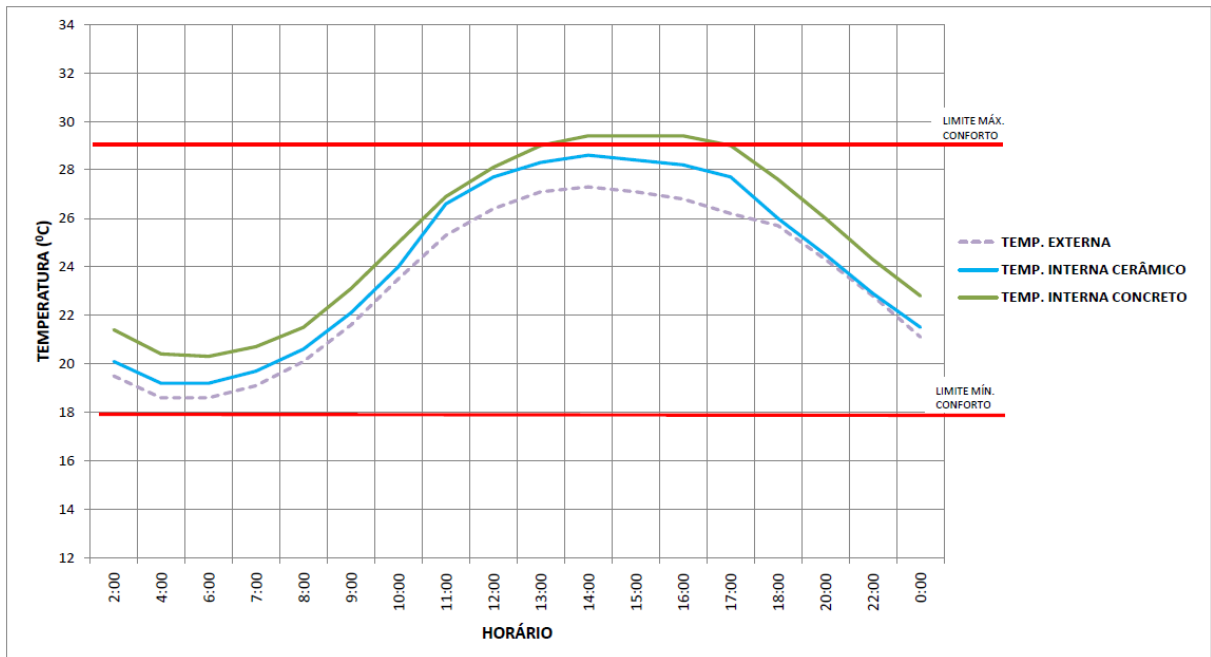


Figura 5.6 – Distribuição horária de TBS para o solstício de verão

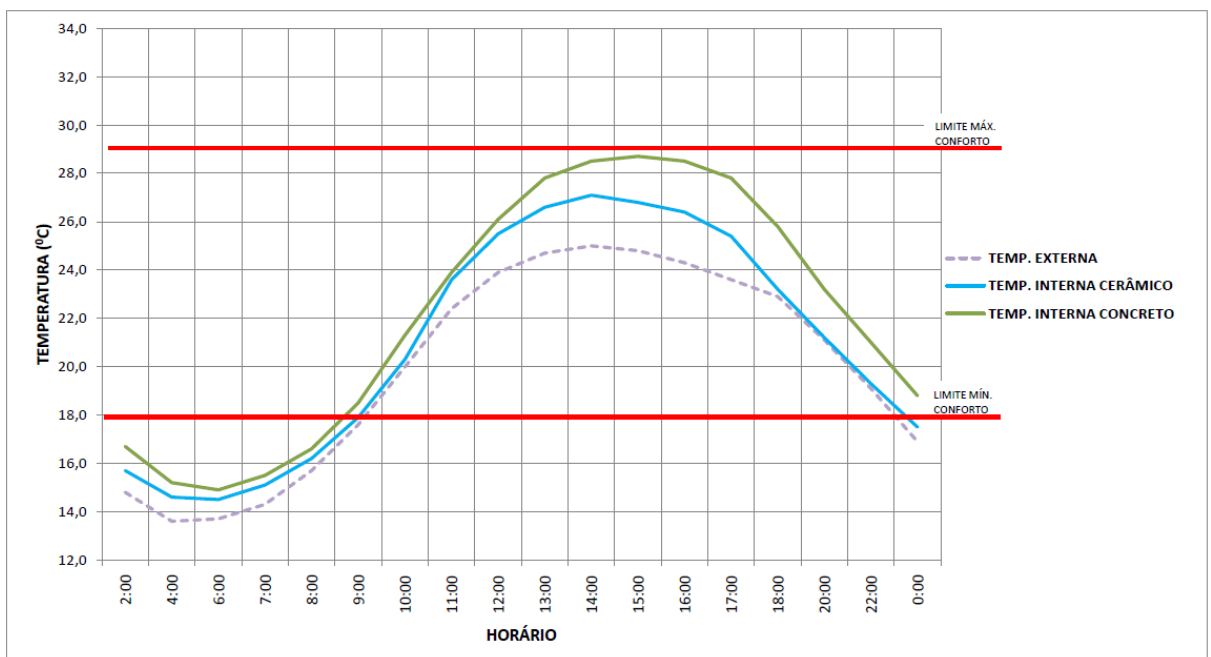


Figura 5.7 – Distribuição horária de TBS para o dia 21 de junho, solstício de inverno

Os gráficos de distribuição de fluxo térmico, figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, indicam que nas duas datas analisadas, solstício de verão e solstício de inverno, as habitações apresentam

comportamentos similares de distribuição do fluxo térmico ao longo do dia. Nota-se que há perda de calor no período noturno e da manhã, entre as 22:00 hs e as 11:00 hs e os horários de pico negativo são registrados às 6:00 hs. A maior transferência de calor entre a habitação e o meio externo, responsável pelo resfriamento do ambiente, se dá por meio da cobertura e fachadas (envoltórias), seguidas pela ventilação e uma parcela mínima pelas áreas envidraçadas.

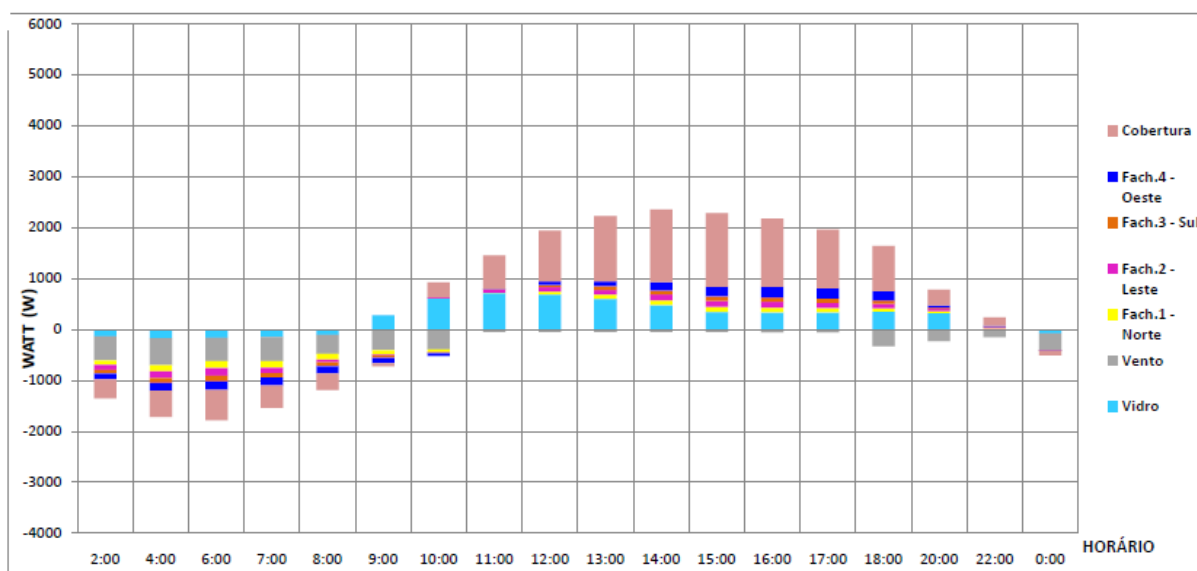


Figura 5.8 – Habitação com envoltória de blocos cerâmicos - Distribuição do fluxo térmico no solstício de verão

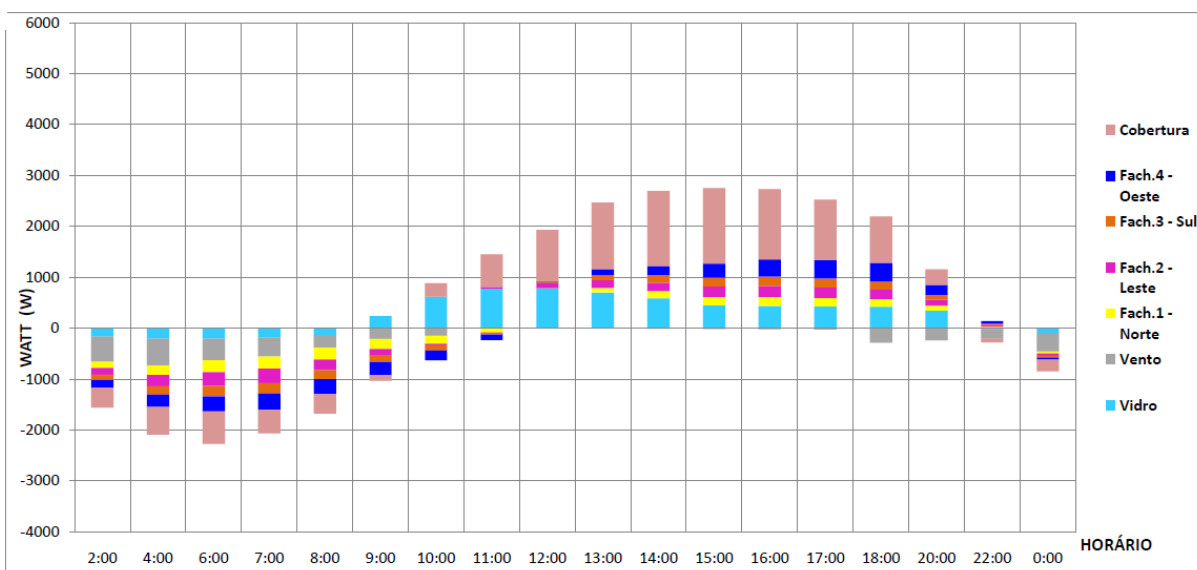


Figura 5.9 – Habitação com envoltórias de blocos de concreto - Distribuição do fluxo térmico no solstício de verão

Em relação aos ganhos de calor, observa-se nos gráficos das figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, que eles ocorrem entre as 10:00 hs e 20:00 hs. Os horários de pico são registrados às 14:00 hs e 15:00 hrs. As coberturas, fachadas (envoltórias), seguidas pelas áreas envidraçadas são os componentes que mais contribuem para a transferência de calor do meio externo para o interno. Comparando-se o ganho de calor pelas fachadas no solstício de verão, figuras 5.8 e 5.9, observa-se que ele é superior nas envoltórias de blocos de concreto em relação as vedações em blocos cerâmicos.

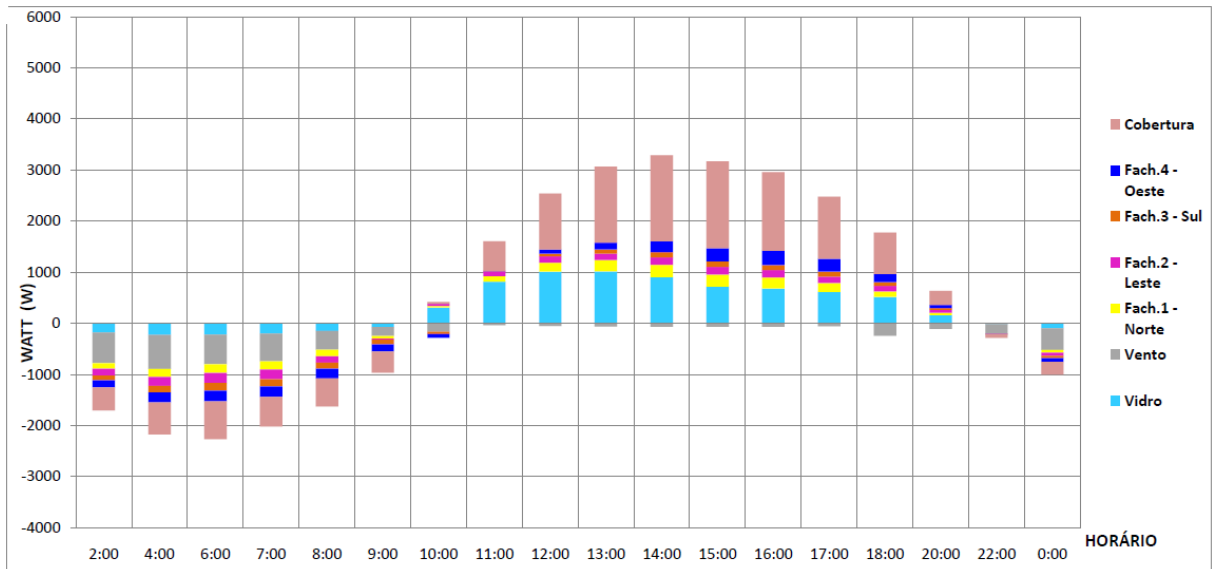


Figura 5.10– Habitação com envoltória de blocos cerâmicos - Distribuição do fluxo térmico no solstício de inverno

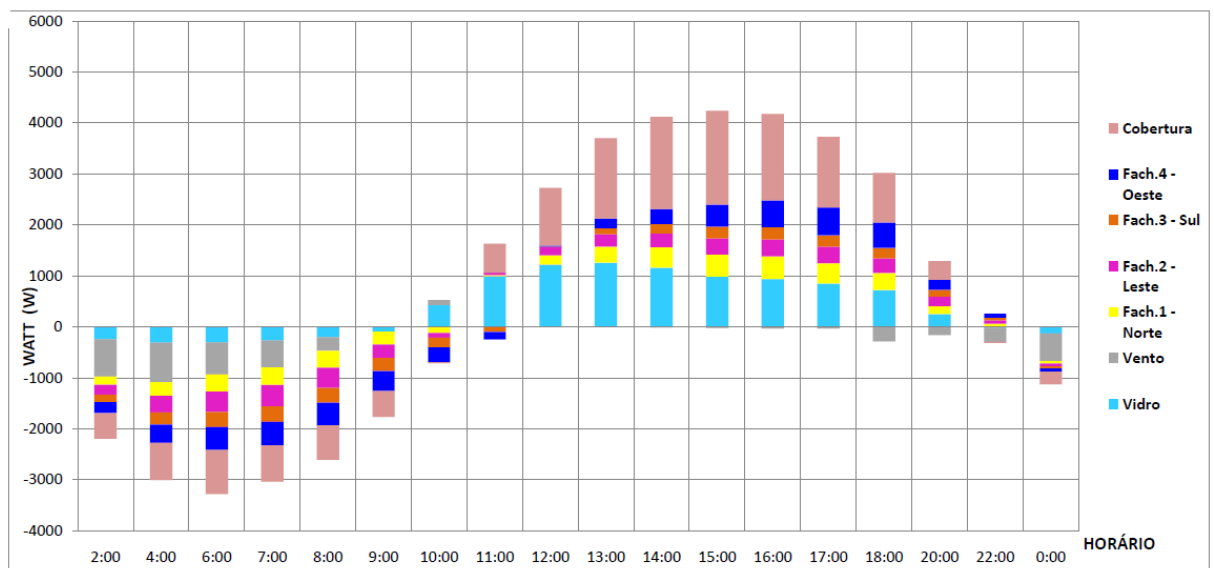


Figura 5.11– Habitação com vedação de blocos de concreto - Distribuição do fluxo térmico no solstício de inverno

No solstício de inverno, figuras 5.10 e 5.11, o ganho de calor através das envoltórias de blocos cerâmicos garantem temperaturas internas dentro da zona de conforto estipulada.

Os resultados indicam a importância do comportamento das envoltórias no desempenho térmico de uma edificação já que as fachadas são responsáveis por grande parte das transferências de calor entre ambientes externos e internos.

Os resultados validam a avaliação por prescrição, visto que, a envoltória de blocos cerâmicos apresentou maior quantidade de horas dentro da zona de conforto térmico, as menores temperaturas internas no verão além de proporcionar ganhos de calor inferiores no solstício de verão. Portanto, as envoltórias de blocos cerâmicos possuem melhor desempenho térmico.

5.4. Levantamento do Material

A tabela 5.6 apresenta os valores em massa (kg) calculados para cada fachada e a massa total que representa o somatório do material utilizado na vedação externa. A massa correspondente aos blocos engloba o próprio bloco e a argamassa de assentamento dos mesmos. O cálculo desconsiderou as paredes internas da tipologia de referência.

Tabela 5.6 – Quantitativo de materiais .

Material	Fachada Frontal Massa (kg)	Fachada Posterior Massa (kg)	Fachada Esquerda Massa (kg)	Fachada Direita Massa (kg)	Vedação Externa Total Massa (kg)
Bloco Cerâmico Largura = 9 cm	628,75	905,4	1114,14	1021,09	3669,38
Bloco Cerâmico Largura = 14 cm	797,50	1148,40	1413,17	1295,14	4654,21
Bloco Cerâmico Largura = 19 cm	985	1418,40	1745,42	1599,64	5748,46
Bloco de Concreto Largura = 9 cm	1016,25	1463,40	1800,79	1650,39	5930,83
Bloco de Concreto Largura = 14 cm	1180	1699,20	2090,96	1916,32	6886,48
Bloco de Concreto Largura = 19 cm	1343,75	1935	2381,12	2182,25	7842,12
Reboco (ambas as faces) Espessura = 2 cm	800	1152	1417,60	1299,20	4668,80
Reboco (ambas as faces) Espessura = 4 cm	1600	2304	2835,20	2598,40	9337,60
Reboco (ambas as faces) Espessura = 8,35 cm	3340	4809,60	5918,48	5424,16	19492,24

A planilha orçamentária do projeto padrão de casas populares da Caixa Econômica Federal (CADERNOS CAIXA, 2007), apresenta quantitativos referentes a execução de alvenaria de blocos de concreto, com dimensão de 9x19x39 cm, assentados com argamassa e reboco tipo paulista em

paredes externas. Convertendo os dados em massa e comparando-os com os da tabela 5.6, observa-se que os valores são muito próximos. Esta equivalência indica que os dados foram corretamente gerados.

5.5. Análise do Ciclo de Vida

5.5.1. Definição do Objetivo e do escopo

O objetivo da análise do ciclo de vida nesta pesquisa foi avaliar o impacto ambiental de materiais de construção comumente utilizados em envoltórias de edificações de interesse social e comparar os resultados dos sistemas que apresentam desempenhos térmicos similares, tomando-se como base inventários pesquisados na literatura científica, dados existentes no *software* e informações fornecidas pelas indústrias. Foram realizadas análises simultâneas considerando duas unidades funcionais denominadas UF1 e UF2. UF1 é a envoltória de uma tipologia residencial de 42 m² implantada em Belo Horizonte, no bairro Pampulha e a UF2 é o desempenho térmico da mesma envoltória situada no mesmo local.

Como fronteiras do sistema foi estipulado a abrangência da extração da matéria prima até o transporte do produto ao local de implantação da edificação conforme demonstrado nos fluxogramas das figuras 5.12 e 5.13.

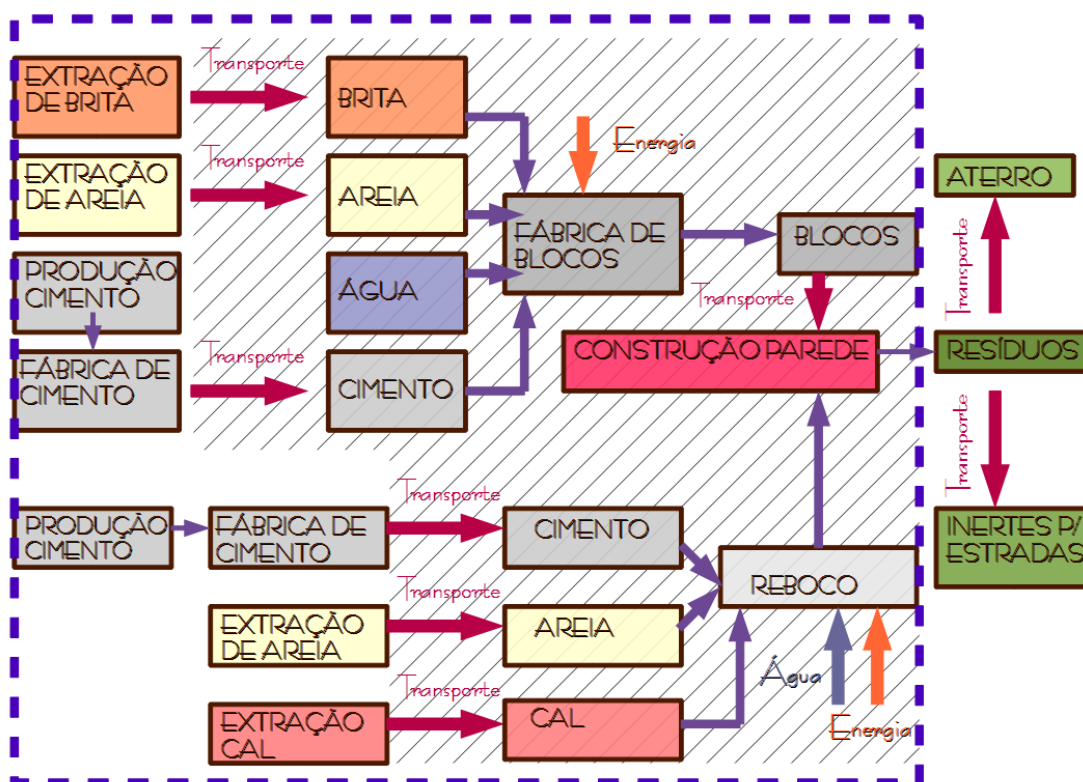


Figura 5.12 – Fronteiras do sistema (envoltórias em bloco de concreto)

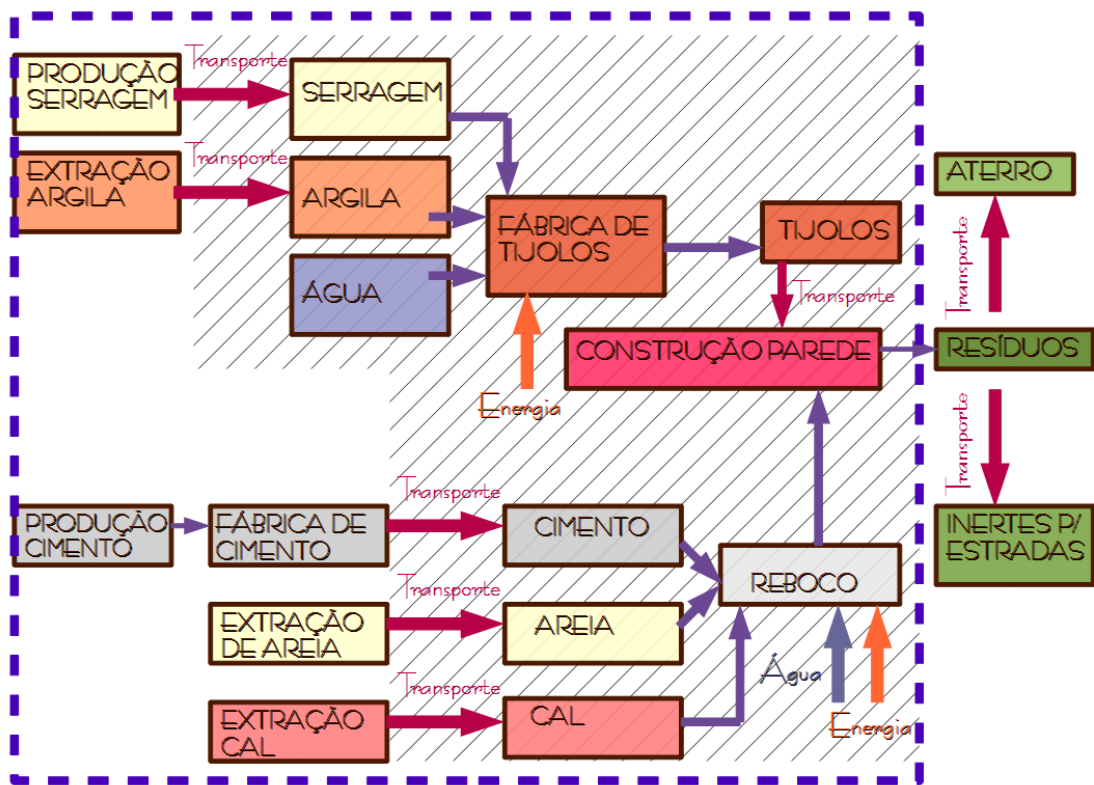


Figura 5.13 – Fronteiras do sistema (envoltórias em bloco de cerâmico)

No *software* SimaPro os dados de entrada referentes a etapa de definição do objetivo e escopo da ACV foram inseridas de acordo com a figura 5.14.

Assistentes	
Assistentes	Nome
Objetivo e âmbito	ACV ENVOLTÓRIAS
Descrição	Data
Bibliotecas	10/03/2009
Requisitos IQD	Autor
Inventário	Júlia Hallack Sansão
Processos	Comentário
Fases do produto	Após a análise do desempenho térmico de envoltórias em alvenaria estrutural utilizando blocos de diferentes naturezas (concreto e cerâmico) e espessuras compara-se os impactos ambientais das mesmas durante os seus respectivos ciclos de vida.
Descrições do sistema	Avaliação de impacto
Tipos de resíduos	Métodos
Parâmetros	configurações de cálculo
	Interpretação
	Interpretação
	ligações a Documentos
Dados gerais	Objetivo
Referências bibliográficas	O objetivo da análise do ciclo de vida nesta pesquisa foi avaliar o impacto ambiental de materiais de construção comumente utilizados em envoltórias de edificações de interesse social e comparar os resultados dos sistemas que apresentam o mesmo desempenho térmico tomando-se como base inventários pesquisados na literatura científica, dados existentes no software e informações fornecidas pelas indústrias.
Ponderação IQD	Motivo
Substâncias	Pesquisa acadêmica
Unidades	Promotor
Grandezas	UFMG
Imagens	Parte interessada
	Engenheiros, arquitetos, fabricantes de materiais de construção e pesquisadores
	Profissional
	Júlia Hallack Sansão
	Unidade funcional
	A unidade funcional é a envoltória de uma tipologia residencial de 42 m ² com resistência térmica pré-estabelecida situada na cidade de Belo Horizonte.
	Fluxos de referência

Figura 5.14 – Descrição do objetivo e escopo da pesquisa no SimaPro

5.5.2. Inventário

O inventário referente à fase de extração de matéria prima foi fornecido pelo banco de dados Ecoinvent, IDEMAT 2001 e ETH-ESU 96 existentes no *software* SimaPro. No entanto, a quantificação de entradas e saídas de materiais, energia e emissões referentes ao transporte das mesmas até as fábricas, a etapa de produção do blocos e ao transporte dos produtos até obra foi realizada a partir de dados fornecidos pelas fábricas produtoras e complementados pela literatura (GAMA, 2010; MASTELLA, 2002; TRAJANO,2010; SOARES *et al.*, 2004). Os bancos de dados estrangeiros foram escolhidos e adaptados em função dos processos e matérias-primas mais próximos a realidade nacional. Estas etapas apresentam-se sobre hachuras nas figuras 5.12 e 5.13. No *software* SimaPro, primeiramente foi realizado o inventário dos processos e posteriormente o inventário das fases do produto.

a) Processos

Nesta etapa da ACV foram verificados os processos necessários para a construção das envoltórias analisadas, desta forma, são inventariados a fabricação de 1kg de bloco de concreto, 1kg de bloco cerâmico e 1kg de reboco.

a.1) Fabricação de 1kg de Bloco de Concreto

O fabricante de blocos de concreto que contribuiu para a pesquisa, Bloco Sigma, utiliza cimento do tipo CPV Ari Plus Holcim e como agregado pó de pedra e brita 00 os últimos materiais correspondem respectivamente a 35% e 65% do total de agregados utilizados. Para a produção de 1 kg de bloco de concreto são necessários 0,559kg de pó de pedra, 0,301 kg de brita, 0,08 kg de cimento CPV e 0,06kg de água. A eletricidade gasta corresponde a 0,00625 KWh.

Os transportes das matérias primas das fontes de obtenção até os portões da indústria considerou que a distância média de transporte do pó de pedra é de 26km, de brita 32 km e de cimento 60km. Os dados inseridos no *software* podem ser observados na figura 5.15.

Produtos							
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos							
Nome	Quantidade	Unidade	Grandeza	Alocação %	Tipo de resíduos	Categoria	Comentário
BLOCO DE CONCRETO	1	kg	Mass	100 %	Cement	Construction/Concrete	
(Insira linha aqui)							
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^SCMin	Máx	Comentário	
(Insira linha aqui)							
Entradas							
Entradas conhecidas da natureza (recursos)							
Nome	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^SCMin	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^SCMin	Máx	Comentário	
PO DE PEDRA	0,559	kg	Indefinido				PO DE PEDRA
BRITA	0,301	kg	Indefinido				BRITA
CIMENTO (CP V-ARI)	0,08	kg	Indefinido				CIMENTO
ÁGUA	0,06	kg	Indefinido				ÁGUA
(Insira linha aqui)							
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^SCMin	Máx	Comentário	
ELETRICIDADE	0,00625	kWh	Indefinido				ELETRICIDADE
CAMINHÃO	0,0048	tcm	Indefinido				CIMENTO
CAMINHÃO	0,014534	tcm	Indefinido				PO DE PEDRA
CAMINHÃO	0,007826	tcm	Indefinido				BRITA

Figura 5.15 – Dados de entrada referente à fabricação de 1kg de bloco de concreto

A água utilizada para a fabricação dos blocos de concreto é de poço artesiano existente na indústria sendo esta complementada, quando necessário, pela concessionária Copasa, desta forma, não foi necessário considerar o seu deslocamento. A figura 5.16 apresenta a rede do processo de produção de 1kg de bloco de concreto.

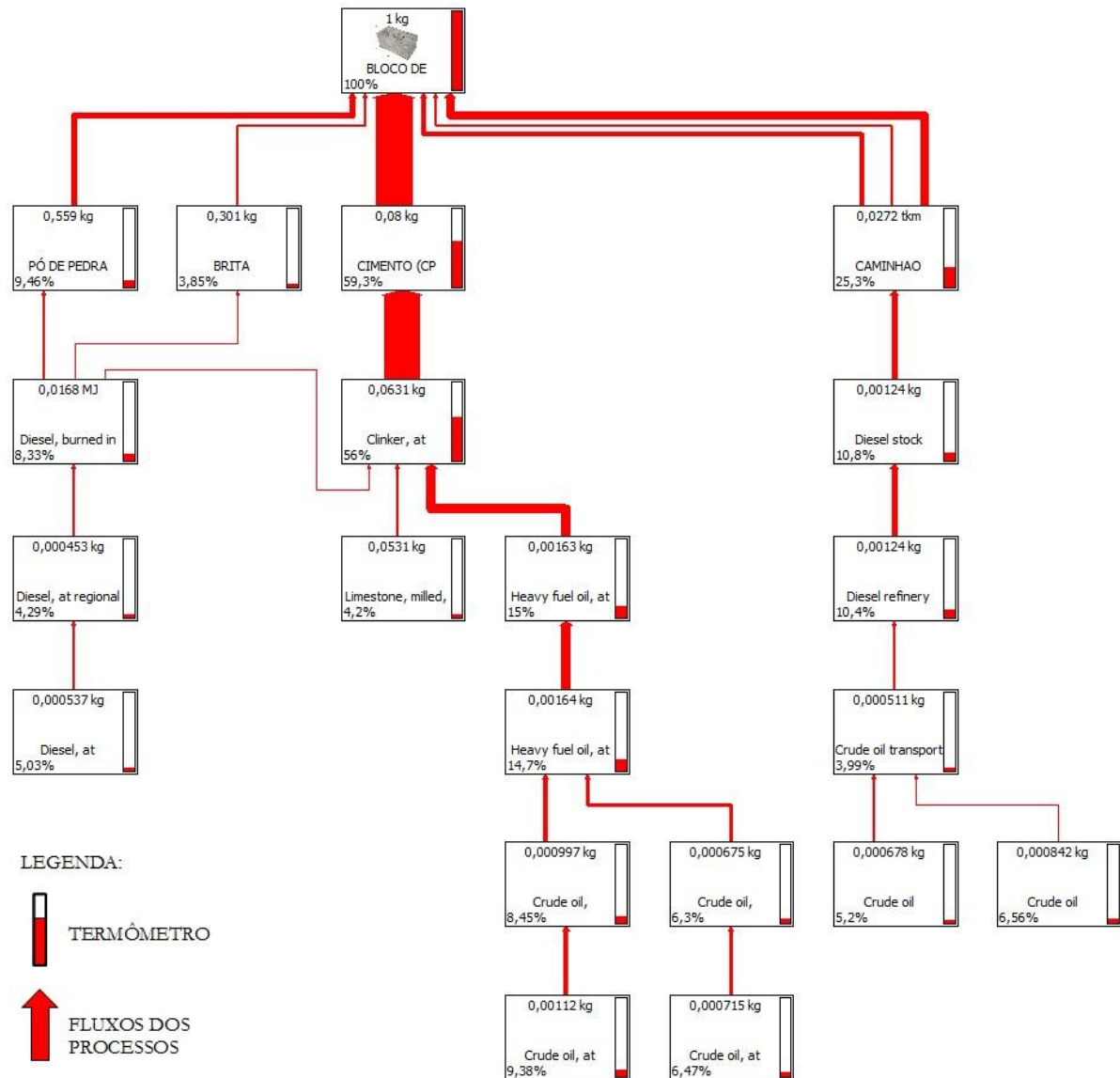


Figura 5.16 – Rede do processo de fabricação de 1kg de bloco de concreto

Aparecem nesta rede produtos que contribuem com mais de 3,5% do processo no qual participam e por isso a água não pode ser visualizada. A partir da observação dos termômetros que demonstram a carga ambiental de cada processo e das setas que representam os fluxos dos mesmos, podemos afirmar que a produção do cimento é a etapa que gera mais impacto ao meio ambiente, devido a presença do clínquer, sendo sucedida pelo transporte das matérias primas.

a.2) Fabricação de 1kg de Bloco Cerâmico

O bloco cerâmico é fabricado com argila mista. De acordo com a fábrica, a quantidade de água para cada bloco tem variação pois a boquilha pode estar um pouco gasta tornando o produto um pouco mais espesso e conseqüentemente mais pesado. O cálculo de água é realizado através da porcentagem sobre o quantitativo de argila variando de 15% a 20%. Considerou-se que a quantidade em peso para confecção de 1kg de bloco cerâmico incorporado na mistura foi de 1,45kg de massa cerâmica e 0,20 kg de água. A energia térmica, de 0,00007 kWh, necessária para a queima da peça foi gerada a partir da combustão de 0,08 cm³ de serragem (biomassa).

As emissões atmosféricas emitidas durante o processo foram deduzidas a partir da literatura científica (MASTELLA, 2002; SOARES *et al.*, 2004), dados doecoinvent e inseridas no processo de fabricação de 1kg de massa cerâmica. A fábrica, Tijolos Jacarandá, que auxiliou no fornecimento de dados referentes a fase de produção, situa-se na região metropolitana de Belo Horizonte, na cidade de Ribeirão das Neves, que dista 46 km da fonte de obtenção da argila. A figura 5.17 apresenta os dados inseridos no *software* SimaPro.

Produtos							
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos							
Nome	Quantidade	Unidade	Grandeza	Alocação %	Tipo de resíduos	Categoria	Comentário
BLOCO CERÂMICO	1	kg	Mass	100 %	Ceramics	Ceramics	
(Insira linha aqui)							
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD [^] 2 ou 2 [^] SCMin	Máx	Comentário	
(Insira linha aqui)							
Entradas							
Entradas conhecidas da natureza (recursos)							
Nome	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD [^] 2 ou 2 [^] SCMin	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD [^] 2 ou 2 [^] SCMin	Máx	Comentário	
MASSA CERÂMICA	1,456	kg	Indefinido				ARGILA
AGUA	0,20	kg	Indefinido				ÁGUA
SERRAGEM	0,08	cm3	Indefinido				COMBUSTÍVEL BIOMASSA
(Insira linha aqui)							
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD [^] 2 ou 2 [^] SCMin	Máx	Comentário	
ELETRICIDADE	0,00169	kWh	Indefinido				ELETRICIDADE
CAMINHÃO	0,06716	tkm	Indefinido				CAMINHÃO
ENERGIA DA BIOMASSA	0,00007	kWh	Indefinido				ENERGIA PARA QUEIMA

Figura 5.17 – Dados de entrada referentes à fabricação de 1kg de bloco de cerâmico

A figura 5.18 apresenta a rede dos produtos que contribuem com mais de 9% do processo. A análise do fluxograma nos permite verificar que o processo referente à produção da massa cerâmica é o que mais acarreta impacto ambiental já que as etapas relacionadas à extração e tratamento da argila estão inseridas nesta fase, englobando a maior parte de emissões de poluentes na atmosfera referentes a queima do material. O transporte da matéria-prima até a fábrica também apresenta termômetro com alta carga ambiental.

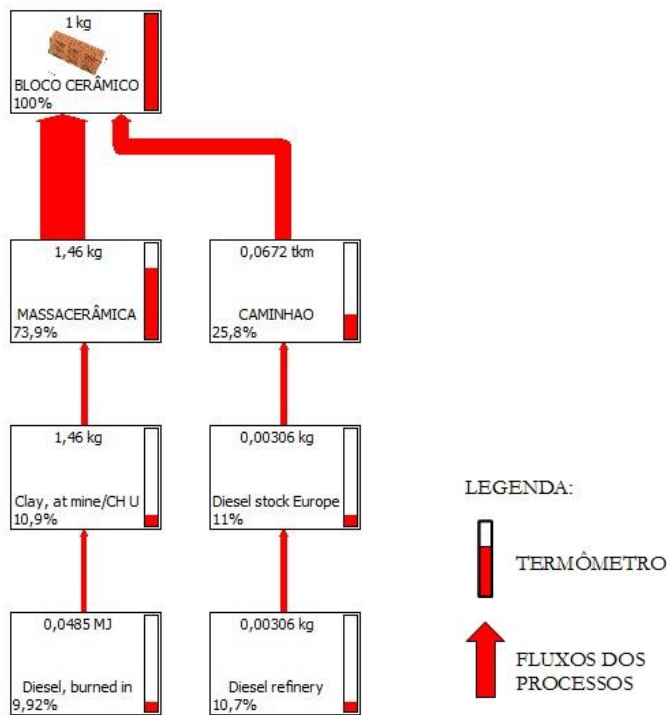


Figura 5.18 – Rede do processo de fabricação de 1kg de bloco de cerâmico

a.3) Fabricação de 1kg de Reboco

O traço utilizado para fabricação do reboco foi 1 : 2 : 9 (cimento : cal : areia). A quantidade de água considerada foi a suficiente para se obter uma boa trabalhabilidade, sendo a ordem de 0,70 da quantidade de aglomerante (cimento + cal). Desta forma, para a produção de 1 kg de reboco são necessários 0,0709 kg de cimento, 0,1418 kg de cal, 0,6381 kg de areia, 0,1488 kg de água.

O cimento utilizado foi CP II-F (com adição de material carbonático - fíler) comumente usado no preparo de argamassas de assentamento e revestimento.

Os transportes das matérias primas das fontes de obtenção até a obra no bairro Pampulha, em Belo Horizonte, considerou que a distância média de transporte do cimento é de 35 km, a de cal 66 km e de areia 15km. A figura 5.19 apresenta os dados inseridos no *software* SimaPro.

Produtos							
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e co-produtos							
Nome	Quantidade	Unidade	Grandeza	Alocação %	Tipo de resíduos	Categoria	Comentário
REBOCO	1	kg	Mass	100 %	Cement	Construction Binders	
(Insira linha aqui)							
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos evitados							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^*SCMin	Máx	Comentário	
(Insira linha aqui)							
Entradas							
Entradas conhecidas da natureza (recursos)							
Nome	Sub-compartimento	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^*SCMin	Máx	Comentário
(Insira linha aqui)							
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materiais/combustíveis)							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^*SCMin	Máx	Comentário	
CIMENTO (CP II-F)	0,0709	kg	Indefinido				CIMENTO
AREIA	0,6381	kg	Indefinido				AREIA
AGUA	0,1488	kg	Indefinido				AGUA
CAL	0,1418	kg	Indefinido				CAL
(Insira linha aqui)							
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)							
Nome	Quantidade	Unidade	Distribuição	SD^2 ou 2^*SCMin	Máx	Comentário	
CAMINHAOREBOCO	0,0024815	tkm	Indefinido				CIMENTO-OBRA
CAMINHAOREBOCO	0,0093588	tkm	Indefinido				CAL-OBRA
CAMINHAOREBOCO	0,0095715	tkm	Indefinido				AREIA-OBRA

Figura 5.19 – Dados de entrada referente à fabricação de 1kg de reboco

A figura 5.20 apresenta a rede dos produtos que contribuem com mais de 5,5% do processo. Assim como no processo de fabricação de 1kg de bloco de concreto, a produção do cimento, mais especificamente do clínquer, são as etapas mais impactantes ao meio ambiente.

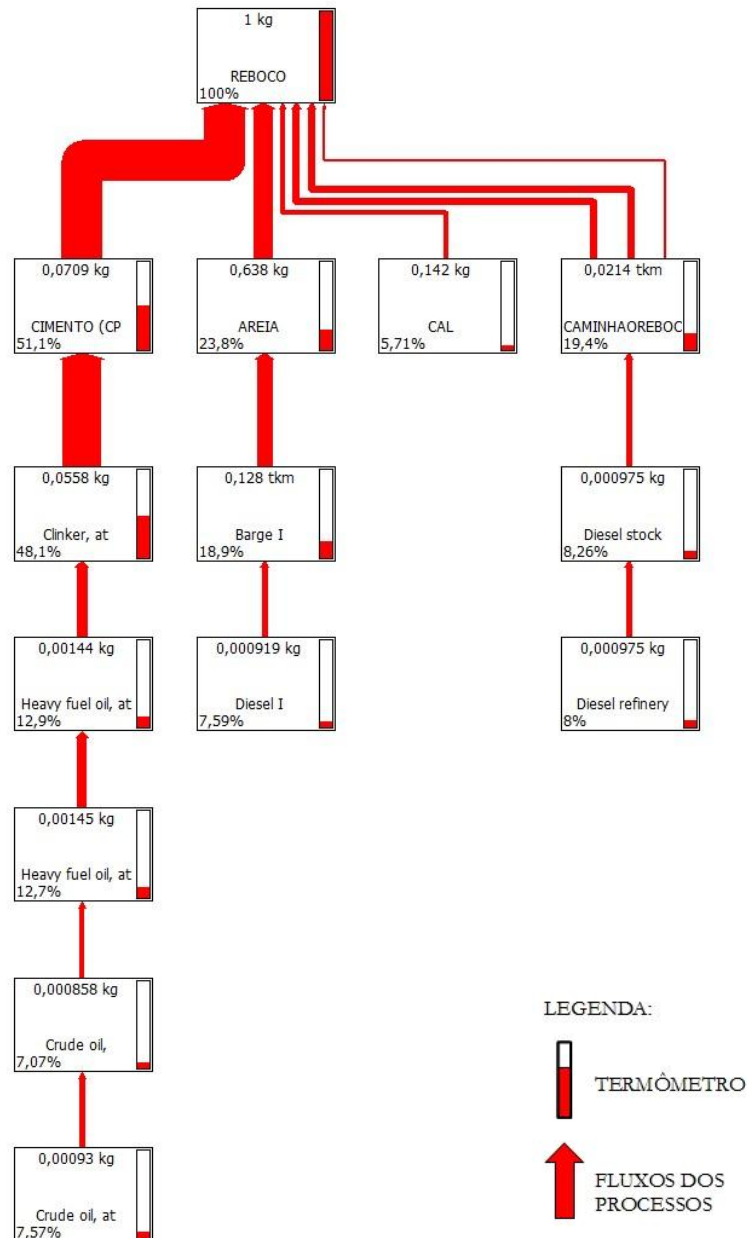


Figura 5.20 – Rede do processo de fabricação de 1kg de bloco de reboco

b) Fases do Produto

O *software* SimaPro apresenta 5 fases do produto que podem ser inventariadas de acordo com os limites do sistema, são elas: montagem, ciclo de vida, cenário de destino final, desmontagem e reutilização. Esta pesquisa, conforme ilustrado nas figuras 5.12 e 5.13 e descrito na etapa referente ao objetivo e escopo do estudo, apresentou como fronteira do sistema o transporte do

produto ao local de implantação da edificação. Desta forma, não foram consideradas as fases que analisam a demolição, o destino dos materiais e suas possíveis reutilizações.

b.1) Montagem

Nesta etapa, os processos inventariados anteriormente, com seus respectivos quantitativos necessários para a construção das envoltórias, levantados no item 5.5, foram associados aos transportes dos blocos até o local de implantação da edificação.

A fábrica de blocos de concreto situada no distrito industrial da cidade de Belo Horizonte encontra-se a 28,8 km da Pampulha (local de construção das envoltórias) e a fábrica de blocos cerâmicos, localizada em Ribeirão das Neves, dista 14 km do bairro.

As figuras 5.21 e 5.22 apresentam como os dados são inseridos no SimaPro para a montagem de paredes com blocos cerâmicos e de concreto, respectivamente.

The screenshot shows the SimaPro software interface for the assembly of a ceramic block wall. The main window displays the following data:

Nome	Imagem	Comentário
PAREDES BL CERAMICO 14 CM		
Estado	<input type="text"/>	
Materiais/Montagens		
BLOCO CERÂMICO	4654,21 kg	Indefinido
REBOCO	4668,80 kg	Indefinido
(Insira linha aqui)		
Processos	Quantidade	Unidade
CAMINHÃO2	65,16	tkm

Figura 5.21 – Dados de entrada referentes à montagem de envoltória com bloco cerâmico

The screenshot shows the SimaPro software interface for the assembly of a concrete block wall. The main window displays the following data:

Nome	Imagem	Comentário
PAREDE BL CONCRETO 14 CM		
Estado	<input type="text"/>	
Materiais/Montagens		
BLOCO DE CONCRETO	6886,48 kg	Indefinido
REBOCO	4668,80 kg	Indefinido
(Insira linha aqui)		
Processos	Quantidade	Unidade
CAMINHÃO2	198,33	tkm

Figura 5.22 – Dados de entrada referentes à montagem de envoltória com bloco de concreto

Foram consideradas as montagens de 8 envoltórias sendo 3 utilizando blocos cerâmicos e 5 blocos de concreto, descritas a seguir:

- Paredes de bloco cerâmico de 9 cm + reboco de 2 cm em ambas as faces + transporte até a obra;
- Paredes de bloco cerâmico de 14 cm + reboco de 2 cm em ambas as faces + transporte até a obra;
- Paredes de bloco cerâmico de 19 cm + reboco de 2 cm em ambas as faces + transporte até a obra;

- Paredes de bloco de concreto de 9 cm + reboco de 2 cm em ambas as faces + transporte até a obra;
- Paredes de bloco de concreto de 14 cm + reboco de 2 cm em ambas as faces + transporte até a obra;
- Paredes de bloco de concreto de 19 cm + reboco de 2 cm em ambas as faces + transporte até a obra;
- Paredes de bloco de concreto de 19 cm + reboco de 4 cm em ambas as faces + transporte até a obra;
- Paredes de bloco de concreto de 19 cm + reboco de 8,35 cm em ambas as faces + transporte até a obra.

b.2) Ciclo de Vida

A etapa correspondente ao ciclo de vida normalmente une a montagem aos cenários de resíduos. No entanto, nesta pesquisa não foi considerada a fase correspondente ao possível reaproveitamento ou reciclagem das envoltórias, desta forma, a análise dos ciclos de vida dos produtos já pode ser realizada a partir da interpretação dos impactos fornecidos pelo *software*. As figuras 5.23 e 5.24 apresentam fluxogramas típicos dos ciclos de vida das envoltórias executadas com blocos de concreto e cerâmicos, respectivamente.

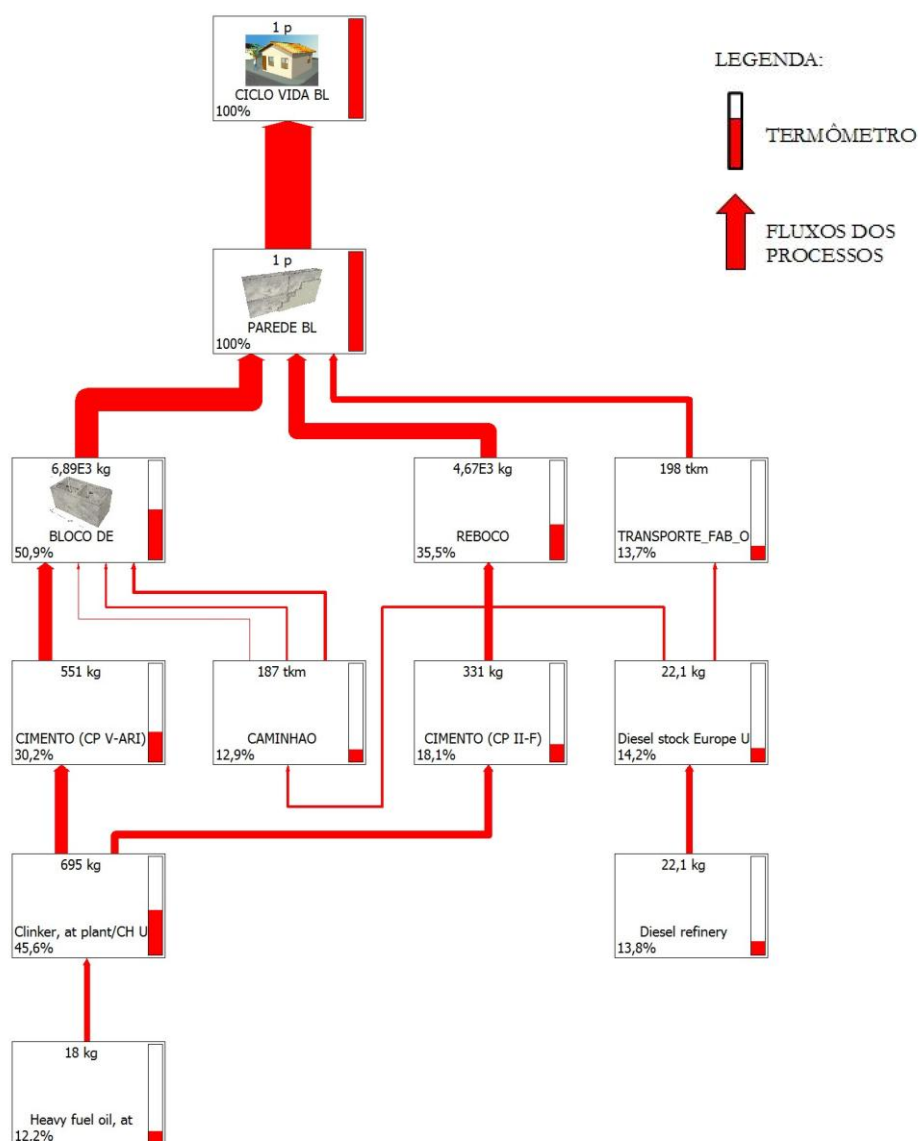


Figura 5.23 – Ciclo de vida das envoltórias executadas com blocos de concreto

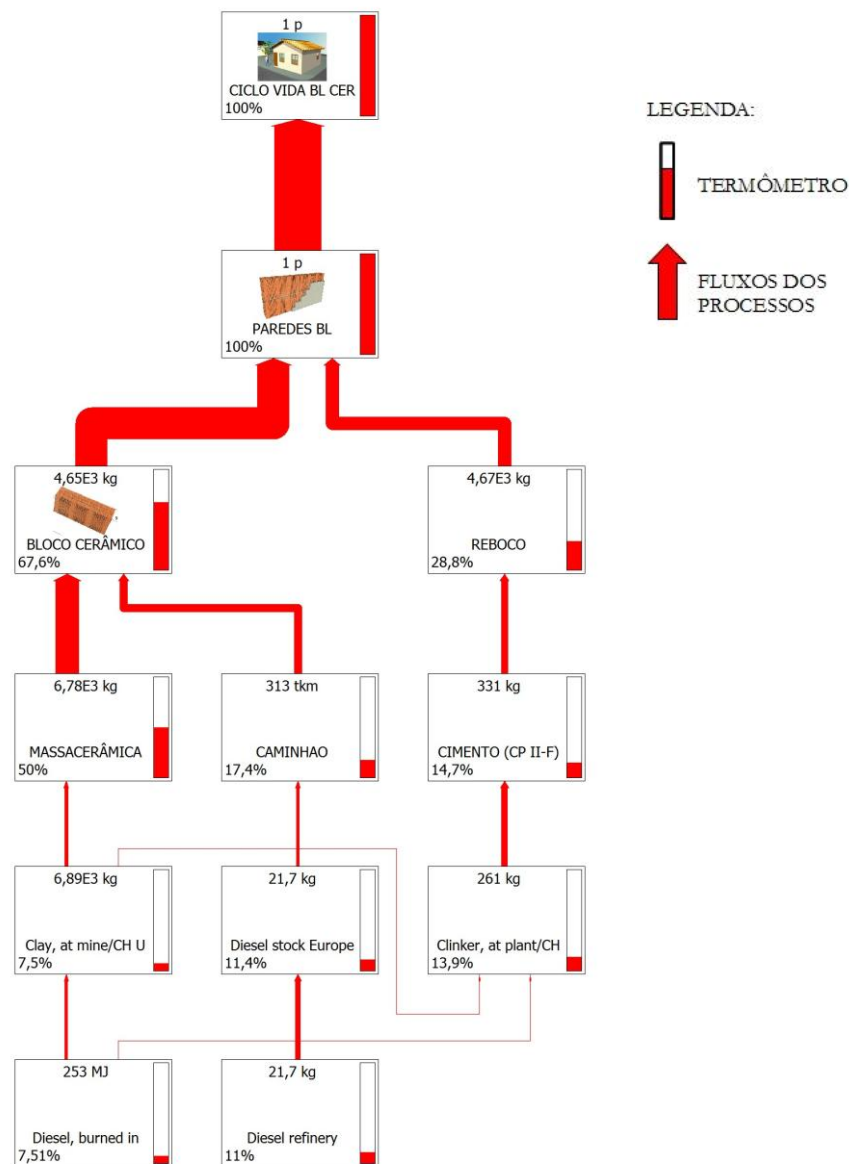


Figura 5.24 – Ciclo de vida das envoltórias executadas com blocos de cerâmicos

5.5.3. Avaliação de Impacto

Na avaliação de impacto foram considerados os elementos obrigatórios (escolha do método, classificação e caracterização) e os opcionais (agrupamento, normalização e ponderação). O recurso oferecido pelo *software* SimaPro para avaliação de impactos, denominado pontuação única, também foi utilizado.

O método selecionado foi o Eco-indicator 99 v2.05. Desta forma os resultados foram orientados para os danos à saúde humana, ao ecossistema e aos recursos naturais e apresentados de acordo com a unidade funcional utilizada.

A simulação considerando a unidade funcional UF1, avaliou seis sistemas de vedações iguais, em blocos de 9,14 e 19cm de largura, mesmos comprimentos e alturas, revestidos em ambos os lados com reboco de 2 cm de espessura. Os resultados referentes a avaliação utilizando a unidade

funcional UF2, analisou quatro envoltórias que, em pares, apresentaram o mesmo desempenho térmico. Desta forma, as envoltórias de blocos cerâmicos de 9 cm de largura, com reboco de 2 cm (em ambos os lados) e as de blocos de concreto de 19 cm de largura, com reboco de 4 cm (em ambos os lados) possuem desempenho térmico 1 (D1). Envelopes construtivos de blocos cerâmicos de 14 cm de largura, com reboco de 2 cm (em ambos os lados) e as de blocos de concreto de 19cm de largura, com reboco de 8,35 cm (em ambos os lados) possuem desempenho térmico 2 (D2).

A correlação das cargas ambientais do inventário com diferentes categorias de impacto (classificação) foi realizada pelo método Eco-indicator 99 v2.05, assim como a aplicação dos fatores de caracterização e a sua conversão para unidades comuns (indicadores de categoria).

Os resultados referentes a caracterização de todas as envoltórias foram convertidos em porcentagem. A figura 5.25 ilustra a simulação utilizando como unidade funcional a UF1. Os resultados indicam que os ciclos de vida das paredes executadas em blocos cerâmicos (nas cores rosa, verde e laranja), quando comparados aos dos envelopes construtivos em blocos de concreto (azul, cinza e roxo), contribuem significativamente mais para as seguintes categorias de impacto:

- Substâncias inorgânicas respiráveis (contaminação atmosférica por compostos inorgânicos);
- Mudança climática (intensificação do efeito estufa por emissão de gases);
- Radiação ionizada (emissão de substâncias radioativas para o ar e água);
- Acidificação/Eutrofização (efeitos no ecossistema por emissão de substâncias acidificantes).

Os indicadores de impacto dos ciclos de vida das envoltórias em blocos de concreto são superiores nas demais categorias como:

- Substâncias carcinogênicas (emissões de substâncias carcinogênicas);
- Depleção da camada de ozônio (aumento da radiação UV);
- Ecotoxicidade (liberação de substâncias tóxicas para o ar, água, solo e cadeias alimentares),
- Uso do solo (transformação e ocupação do solo);
- Minerais (decrécimo na concentração de recursos minerais);
- Combustíveis fósseis (utilização de recursos não renováveis como o petróleo, o carvão mineral, o gás natural e o urânio);
- Substâncias orgânicas respiráveis (altas concentrações de compostos orgânicos na atmosfera).

Observa-se que os ciclos de vida das envoltórias de blocos de concreto apresentam indicadores de impacto superiores em uma maior quantidade de categorias. No entanto, observa-se uma grande variação nas porcentagens, quando comparados os resultados, nas classes aonde os indicadores de impacto maiores são provenientes dos ciclos de vida das vedações cerâmicas.

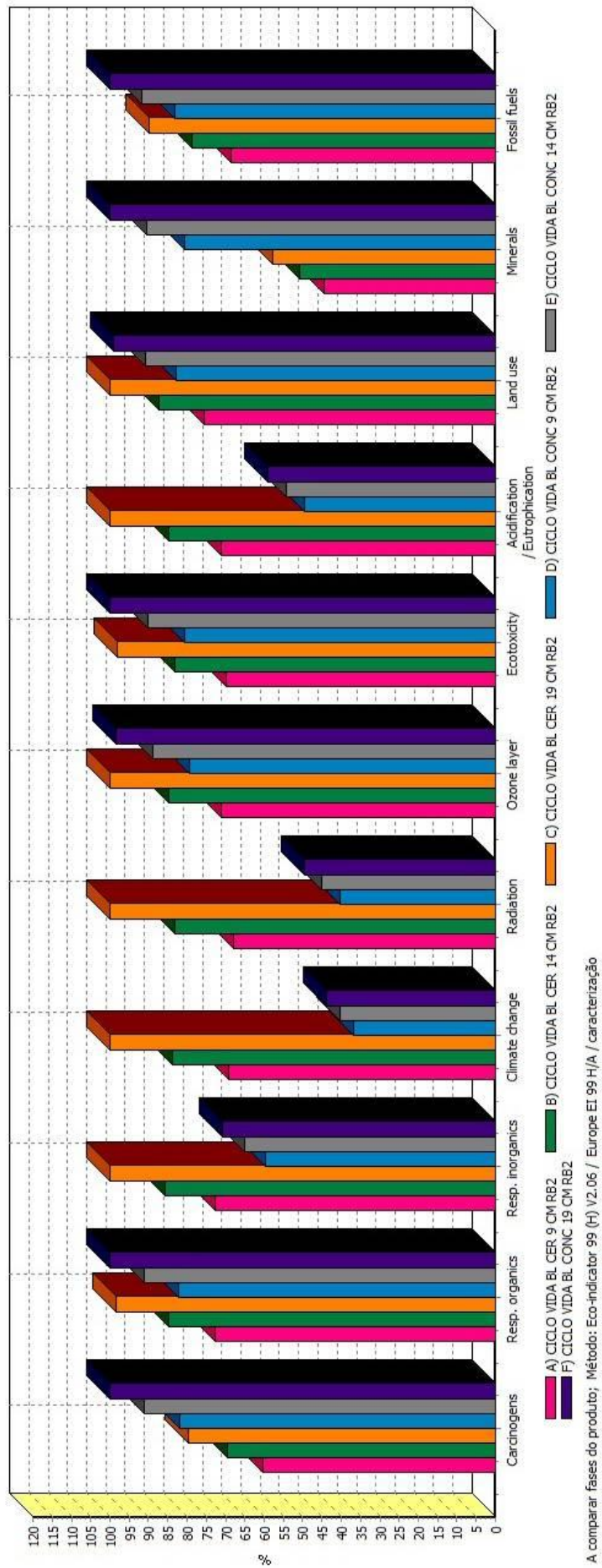


Figura 5.25 – Caracterização dos ciclos de vida das envoltórias considerando a unidade funcional UF1

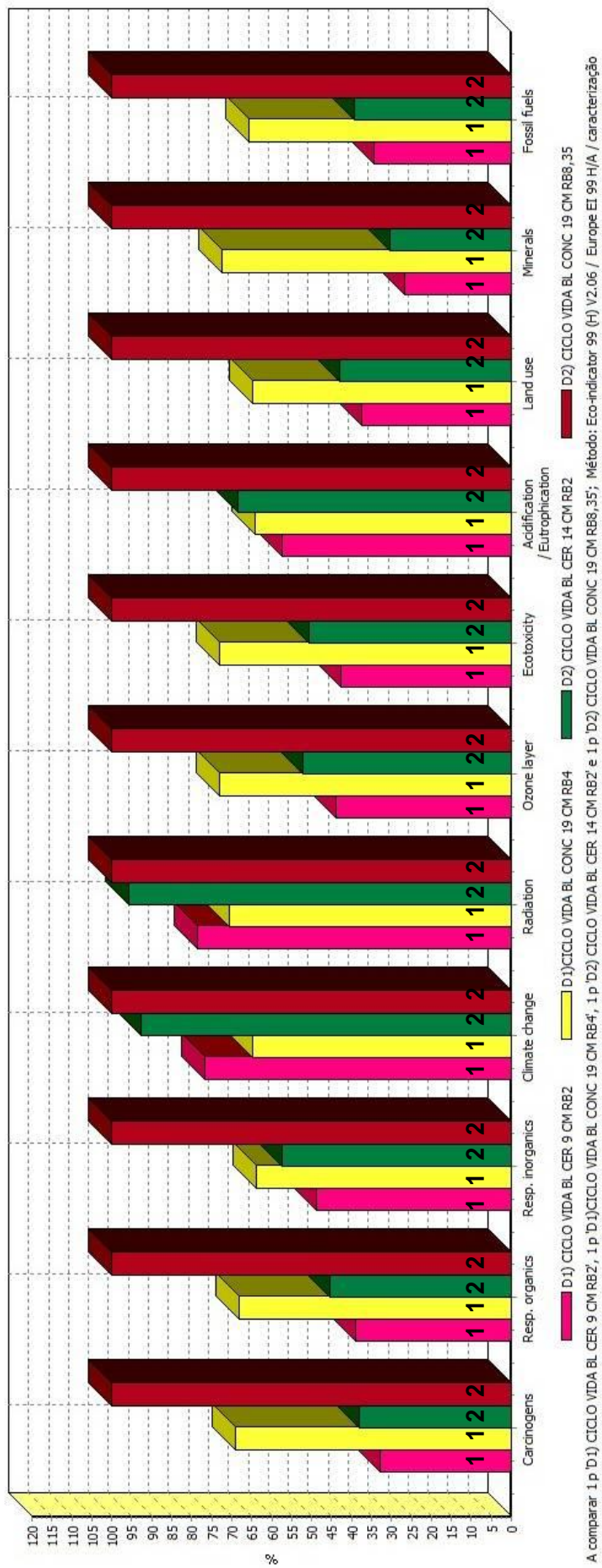


Figura 5.26 – Caracterização dos ciclos de vida das envoltórias considerando a unidade funcional UF2

A figura 5.26 apresenta os resultados da caracterização considerando como unidade funcional o desempenho térmico das envoltórias (UF2). A comparação dos indicadores de categoria dos ciclos de vida das envoltórias de blocos cerâmicos (rosa) com as de blocos de concreto (amarelo) que possuem desempenho térmico 1 (D1), indicam que, com a exceção das categorias de impacto mudança climática e radiação ionizada, os valores relacionados aos ciclos de vida dos envelopes construtivos em blocos de concreto são sempre superiores. Os resultados referentes aos ciclos de vida das envoltórias de blocos cerâmicos (verde) e as de blocos de concreto (vermelho) que apresentam desempenho térmico 2 (D2), indicam que os ciclos de vida de envelopes construtivos de blocos de concreto apresentam maiores valores de indicadores de categoria em todas as classes de impacto.

No estágio de avaliação de danos, os fatores de atribuição de pesos foram diretamente aplicados aos grupos de danos. Os resultados da avaliação de danos foram determinados a partir do agrupamento dos indicadores de categoria de impacto fornecidos pela caracterização em três grupos de danos: para a saúde humana, ao ecossistema e aos recursos naturais.

A figura 5.27 apresenta os resultados da avaliação de danos considerando a unidade funcional UF1. Análise do gráfico nos permite afirmar que os ciclos de vida das envoltórias em blocos cerâmicos apresentam maiores valores de indicadores de categoria de impacto nos grupos de danos à saúde humana e a qualidade do ecossistema.

A figura 5.28 apresenta os resultados da avaliação de danos considerando a unidade funcional UF2. Comparando-se os indicadores de categoria de impacto dos ciclos de vida das envoltórias em blocos de naturezas distintas, de mesmo desempenho térmico, observa-se que os ciclos de vida das envoltórias em blocos de concreto apresentam maiores porcentagens em todos os grupos de danos.

Estes resultados permitem análises dos perfis das Avaliações de Impacto dos Ciclos de Vida (AICV). Na análise utilizando-se como unidade funcional a envoltória de uma tipologia pré-determinada (UF1), os indicadores de categoria dos ciclos de vida das envoltórias em blocos cerâmicos, nas classes de impactos e nos grupos de danos, apresentam porcentagens altas principalmente provenientes de danos relacionados a emissões atmosféricas. Enquanto os indicadores dos ciclos de vida dos envelopes construtivos em blocos de concreto são superiores nos danos referentes a extração de recursos minerais.

Nos resultados referentes aos perfis das Avaliações de Impacto dos Ciclos de Vida (AICV), considerando-se o desempenho térmico das envoltórias (UF2), os indicadores de categoria dos ciclos de vida das envoltórias em blocos concretos são superiores em todas as classes de impactos e grupos de danos.

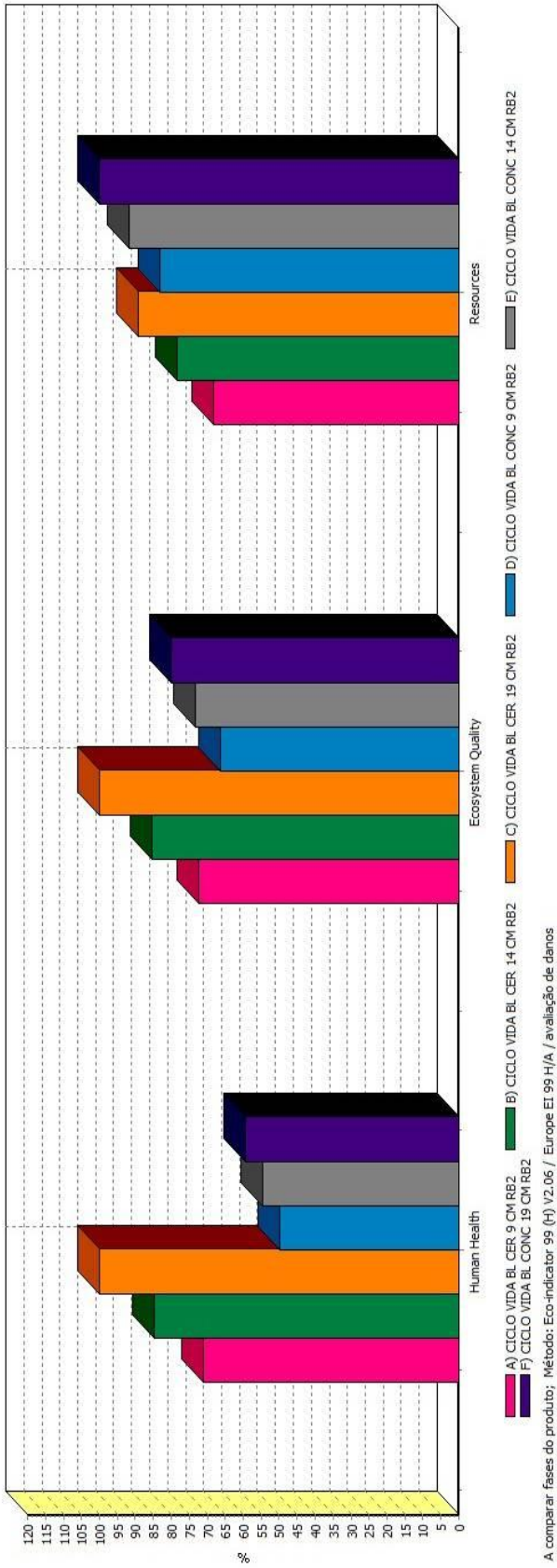


Figura 5.27 – Avaliações dos danos dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF1.

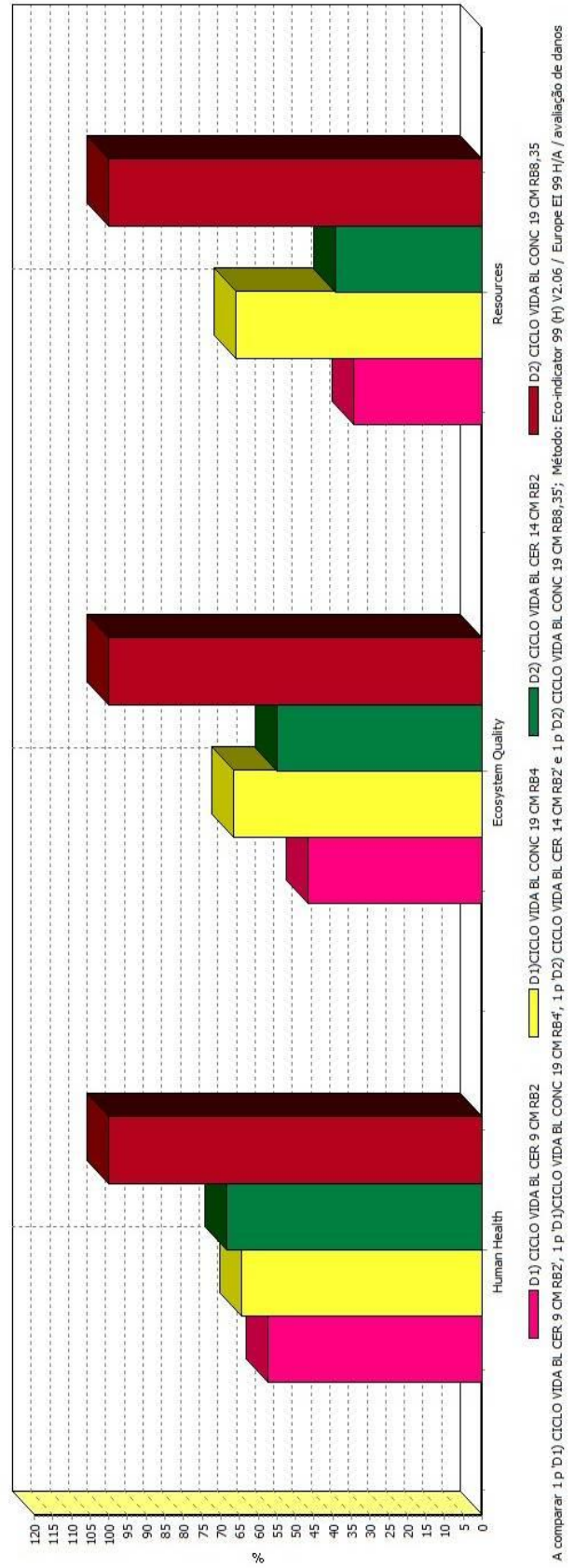


Figura 5.28 – Avaliações dos danos dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF2.

Os resultados referentes a normalização podem ser visualizados nas figuras 5.29 e 5.30, considerando as unidades funcionais UF1 e UF2, respectivamente. Estes gráficos apresentam os efeitos dos impactos, gerados pelos ciclos de vida analisados, em um habitante europeu.

O valores apresentados no gráfico 5.29, indicam que os maiores impactos encontram-se nos grupos relacionados aos danos à saúde humana e aos recursos naturais. Os impactos referentes aos ciclos de vida das envoltórias executadas em blocos de concreto são superiores apenas no grupos de danos aos recursos.

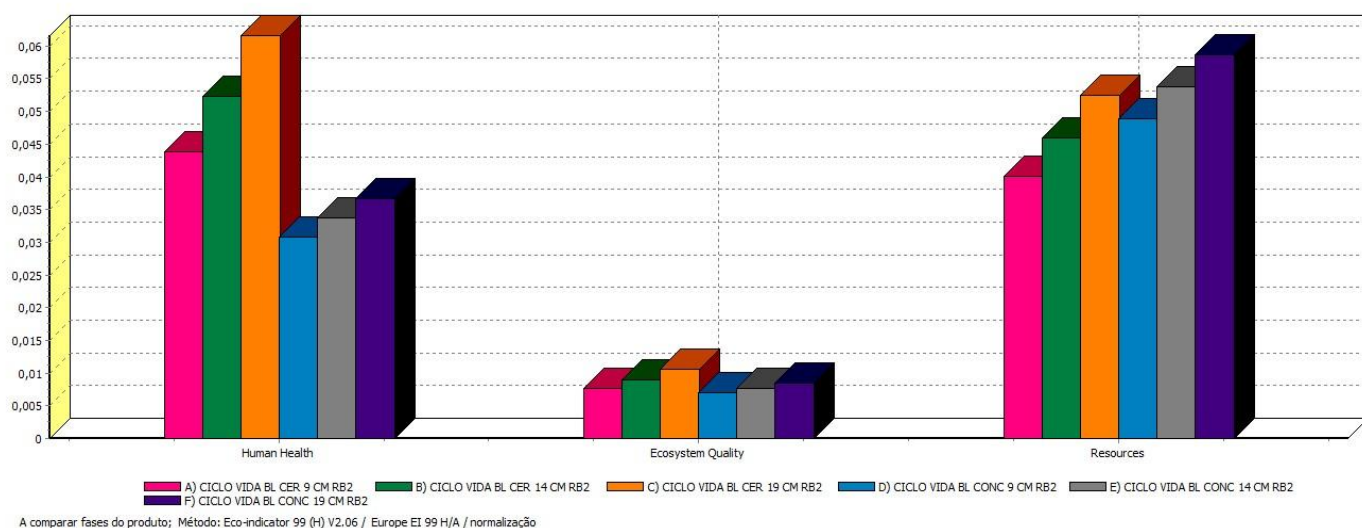


Figura 5.29 – Normalização dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF1.

Os resultados do gráfico 5.30 indicam que para ciclos de vida de envoltórias de blocos de naturezas distintas, com mesmo desempenho térmico, os impactos gerados por aqueles que apresentam fechamentos de blocos de concreto são superiores em todos os grupos de danos.

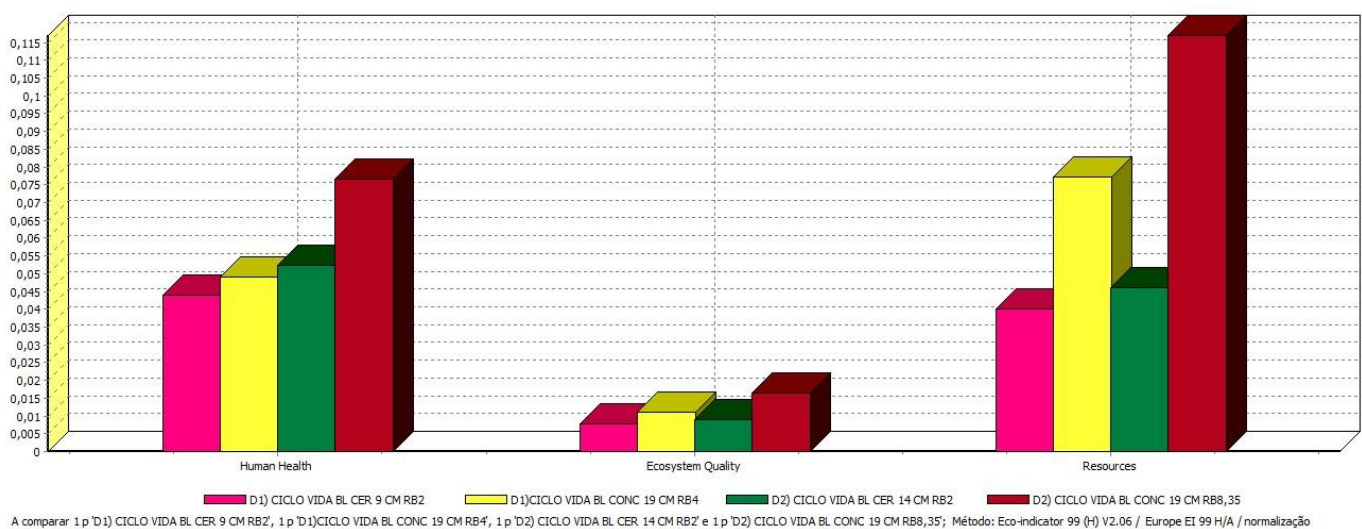


Figura 5.30 – Normalização dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF2.

Os resultados ilustrados nas figuras 5.31 e 5.32, referentes as análises considerando como unidades funcional UF1 e UF2, respectivamente, são produtos da aplicação de um fator de ponderação a cada um dos valores da normalização.

Na fase da ponderação assim como na pontuação única, todos os impactos são apresentados em points (Pt), unidade padrão dos métodos de avaliação dos impactos dos ciclos de vida, cujo a escala é escolhida de maneira que o valor de 1 point (Pt) representa um milésimo do peso ambiental em um habitante europeu médio.

Os resultados da ponderação, considerando a unidade funcional UF1, figura 5.31, indicam que nos grupos referentes aos danos à saúde humana e ao meio ambiente, os pesos ambientais superiores, de aproximadamente 24 Pts e 4 Pts respectivamente, são provenientes do ciclo de vida da envoltória em blocos cerâmicos de 19 cm de largura (laranja). No grupo de danos aos recursos naturais, o ciclo de vida mais impactante é o que possui fechamento em blocos de concreto de 19cm de largura (roxo) com aproximadamente 12 Pts.

A análise comparativa dos ciclos de vida das envoltórias com blocos de mesma dimensão e de naturezas distintas indica que nos grupos de danos à saúde humana e à qualidade do ecossistema, os pesos ambientais dos ciclos de vida dos fechamentos em blocos cerâmicos (rosa verde e laranja), são sempre superiores. No grupo de danos aos recursos naturais, os ciclos de vida dos envelopes construtivos em blocos de concreto (azul, cinza e roxo) apresentam os maiores pesos ambientais. A maior variação de valores de pesos ambientais gerados pelos ciclos de vidas das envoltórias com blocos de mesma família é observado nos grupos de danos à saúde humana, na qual a maior diferença, de aproximadamente 10 Pts, é verificada nas envoltórias executadas com blocos de 19 cm.

A figura 5.32, apresenta os resultados da ponderação considerando envoltórias de mesma dimensão e com desempenhos térmicos similares (UF2). A comparação dos pesos ambientais dos ciclos de vida das envoltórias de blocos cerâmicos (rosa) com as de blocos de concreto (amarelo) que possuem desempenho térmico 1 (D1), indicam que, o valores relacionados aos ciclos de vida dos envelopes construtivos em blocos de concreto são sempre superiores em todos os grupos de danos. Os resultados referentes aos ciclos de vida das envoltórias de blocos cerâmicos (verde) e as de blocos de concreto (vermelho) que apresentam desempenho térmico 2 (D2), indicam que os ciclos de vida de envelopes construtivos de blocos de concreto também apresentam maiores valores de pesos ambientais à saúde humana, à qualidade do ecossistema e aos recurso naturais. No entanto, as diferenças dos valores dos pesos ambientais observados entre ciclos de vida de envoltórias de mesmo desempenho térmico são bem superiores na análise utilizando-se D2.

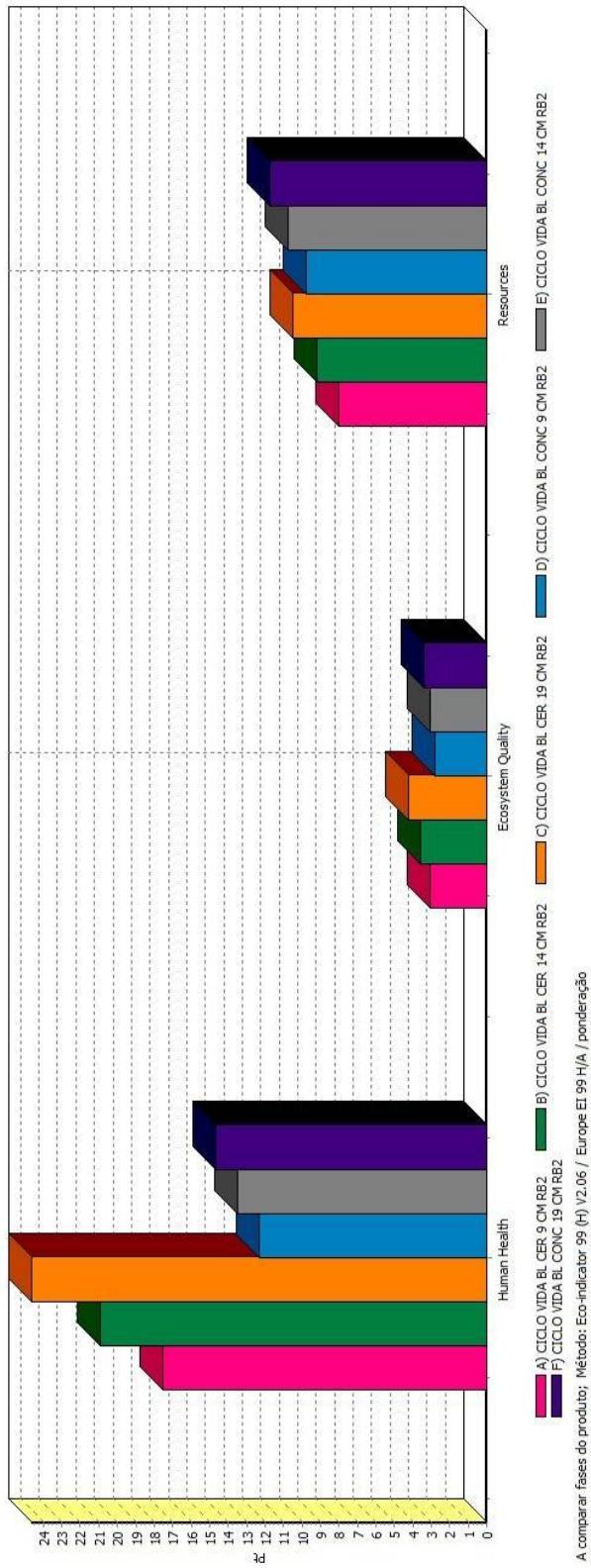


Figura 5.31 – Ponderação dos ciclos de vida das envoltórias utilizando UF1.

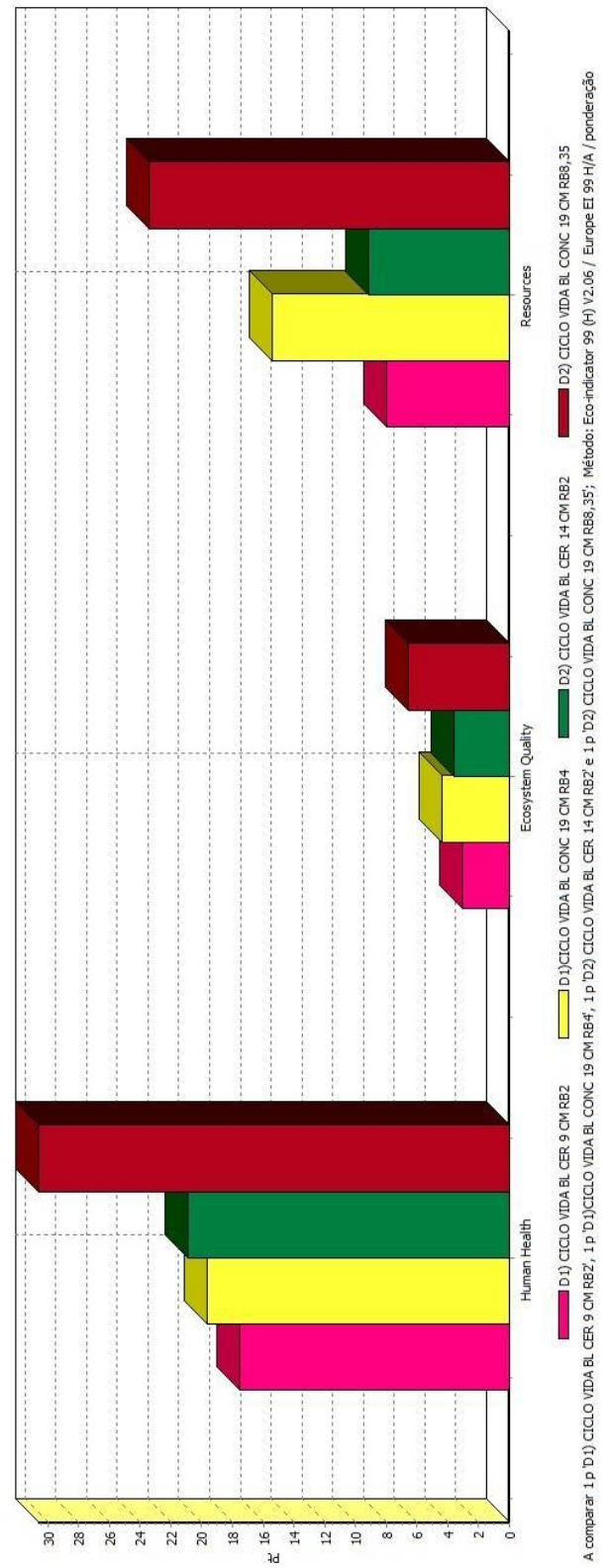


Figura 5.32 – Ponderação dos ciclos de vida das envoltórias utilizando UF2.

As figuras 5.33 e 5.34 apresentam as comparações das pontuações únicas dos ciclos de vida considerando-se UF1 e UF2, respectivamente. Os grupos de danos foram reunidos e divididos por envoltória. Nos dois gráficos, observa-se que o grupos de danos que apresentam maior pontuação é o da saúde humana (rosa) seguido do referente aos danos da extração de recursos minerais.

Os resultados do gráfico da figura 5.33 indicam que o ciclo de vida da envoltória em blocos cerâmicos de 19cm é o que apresenta o maior peso ambiental de 39 Pts, sendo 24 Pts referentes aos danos a saúde humana. O ciclo de vida com menor pontuação é do envelope construtivo em blocos de concreto de 9cm.

A análise comparativa das pontuações únicas dos ciclos de vidas das vedações com blocos de mesmas dimensões e de naturezas distintas, indica que os fechamentos em blocos cerâmicos acarretam maior impacto ambiental devido a maior pontuação no grupo relacionado ao danos na saúde humana.

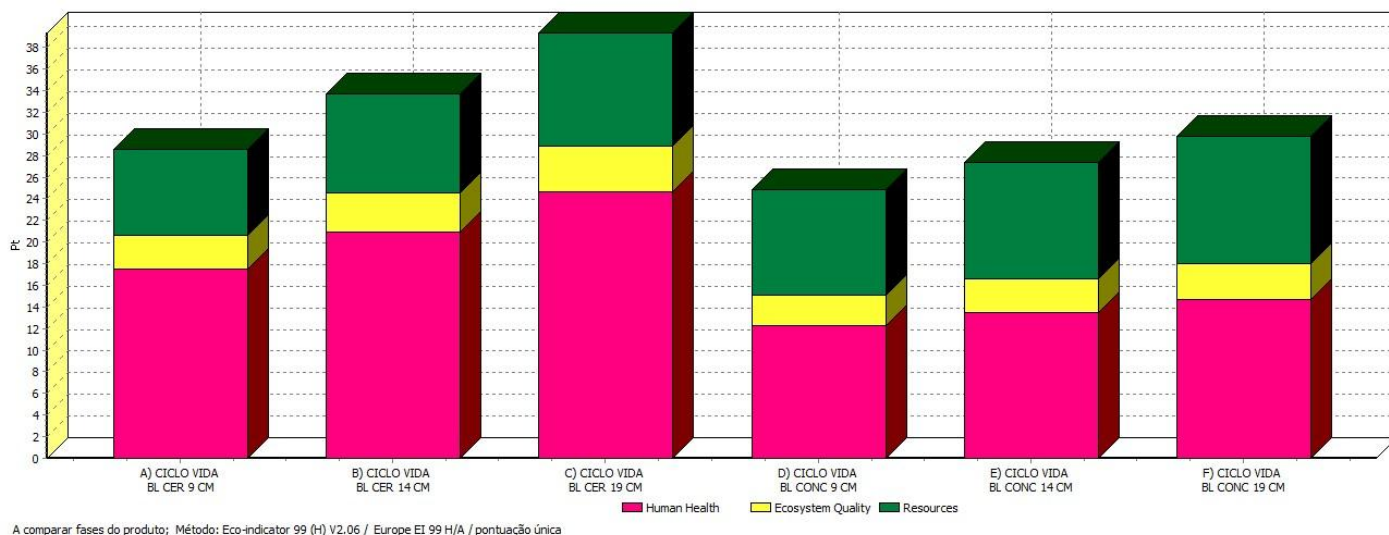
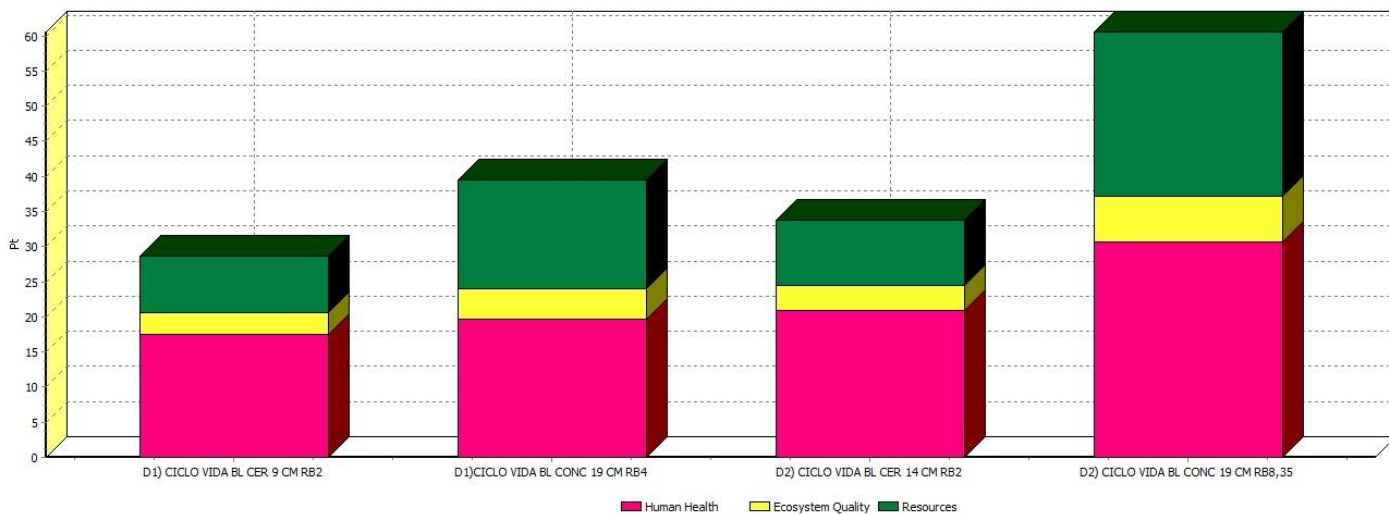


Figura 5.33 – Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF1

A figura 5.34 apresenta os resultados das análises de pontuação única utilizando-se a unidade funcional UF2 (desempenhos térmicos similares). Observa-se que os ciclos de vida das vedações em blocos de concreto sempre acarretam maior impacto ambiental quando comparados aos das envoltórias em blocos cerâmicos de mesmo desempenho térmico. Tal fato deve-se principalmente aos efeitos sobre o grupo de danos relacionado a utilização de recursos naturais.

O ciclo de vida da envoltória em blocos de concreto com desempenho térmico D2, apresenta o maior peso ambiental de 60 Pts , sendo 30 Pts referentes aos danos a saúde humana.



A comparar 1 p 'D1) CICLO VIDA BL CER 9 CM RB2', 1 p 'D1) CICLO VIDA BL CONC 19 CM RB4', 1 p 'D2) CICLO VIDA BL CER 14 CM RB2' e 1 p 'D2) CICLO VIDA BL CONC 19 CM RB8,35'; Método: Eco-indicator 99 (H) V2.06 / Europe EI 99 H/A / pontuação única

Figura 5.34 – Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF2

Os gráficos das figuras 5.35 e 5.36 apresentam as comparações das pontuações únicas dos ciclos de vida considerando as unidades funcionais UF1 e UF2. Neste caso, as categorias de impacto foram reunidas e divididas por ciclo de vida analisado. A análise dos gráficos indicam que as categorias de impacto que apresentam o maior peso ambiental em todas as envoltórias são as referentes ao consumo de combustíveis fósseis como energia excedente para extração de recursos, emissões de substâncias inorgânicas gerando problemas respiratórios e mudanças climáticas resultando em um aumento de doenças e mortes.

Na figura 5.35, os ciclos de vida das envoltórias em blocos cerâmicos apresentam maiores pesos ambientais quando comparadas aos envelopes construtivos com blocos de concreto de mesma família. Este fato deve-se principalmente à maior pontuação na categoria de impacto mudança climática e a contaminação atmosférica por compostos inorgânicos enquadradas no grupo de danos saúde humana.

Os resultados apresentados no gráfico da figura 5.36 indicam que a categoria de impacto que apresenta maior peso ambiental em todos os ciclos de vida analisados refere-se a extração de combustíveis fósseis. Os danos ambientais referentes ao excesso de energia necessária para extrações futuras deste combustível mineral, também são determinantes para tornar os ciclos de vida das envoltórias em blocos de concreto mais impactantes que os ciclos de vida das vedações cerâmicas de mesmo desempenho térmico.

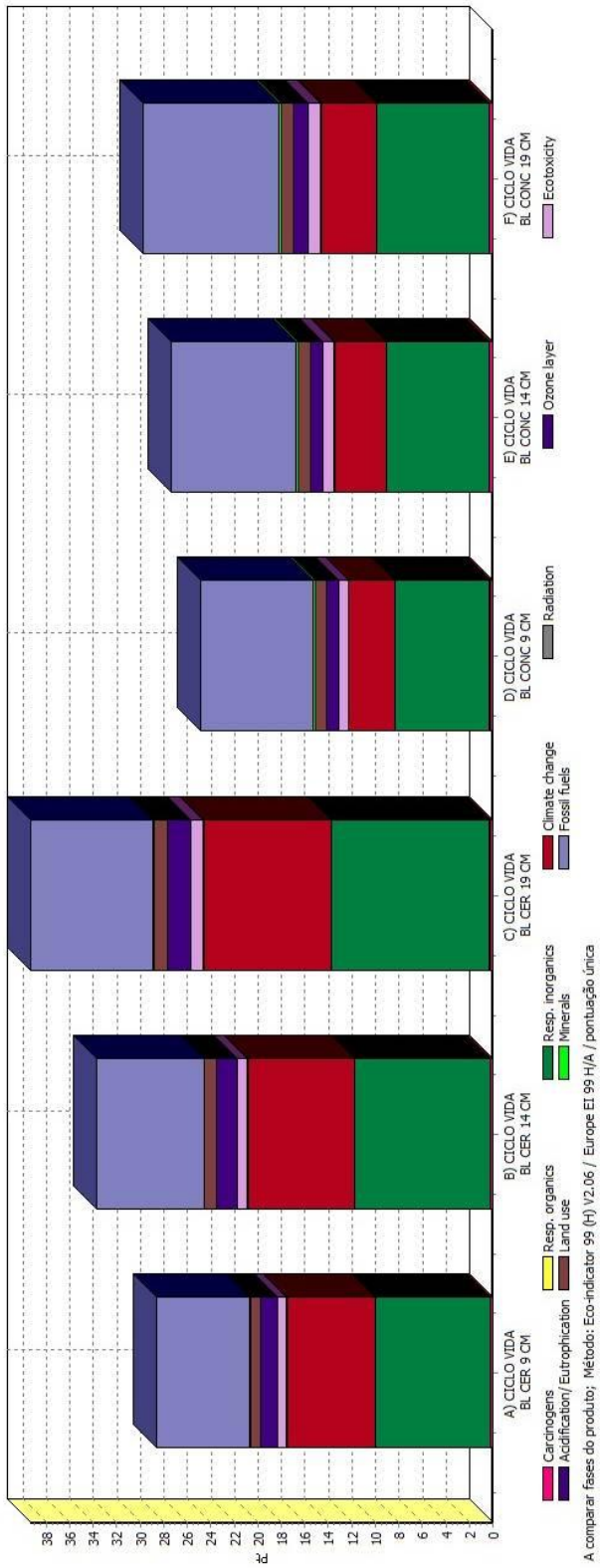


Figura 5.35 – Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF1

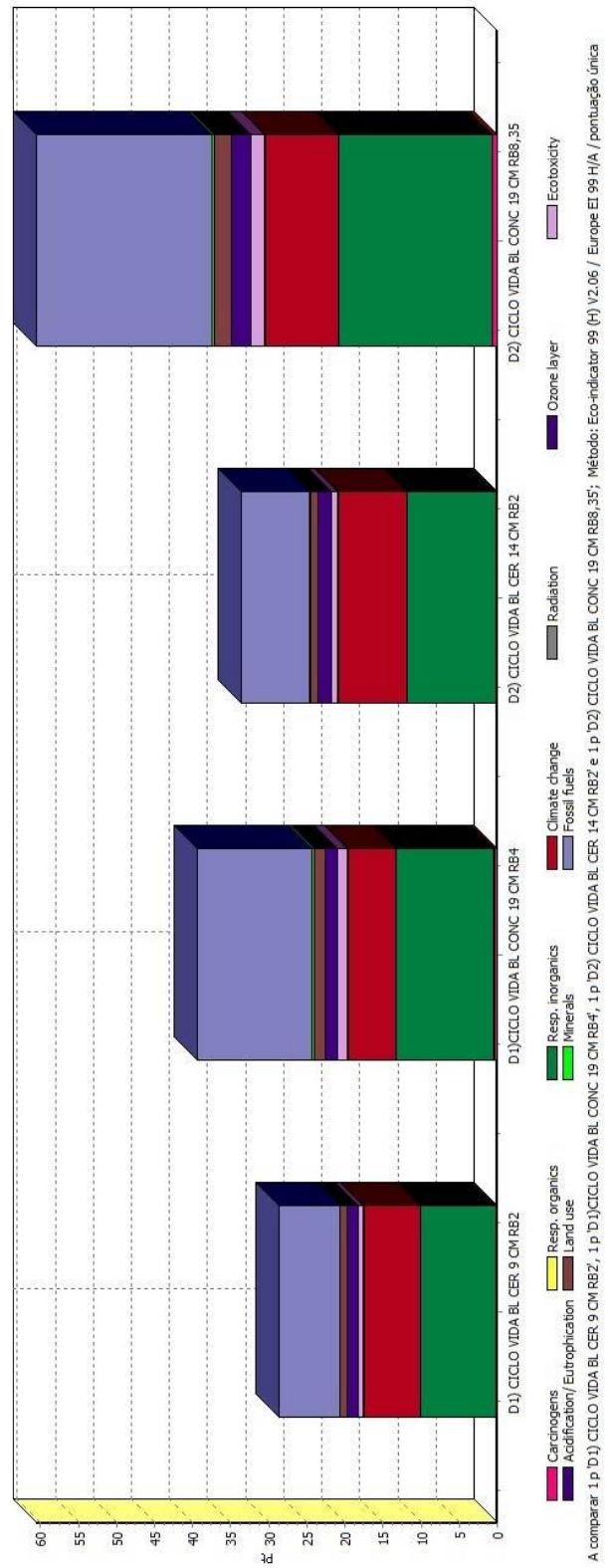


Figura 5.36 – Comparação das pontuações únicas dos ciclos de vida das envoltórias considerando UF2

5.5.4. Interpretação

A comparação das simulações dos impactos ambientais dos sistemas de vedação, tomando-se como unidade funcional a envoltória de uma tipologia residencial, de 42 m², situada em Belo Horizonte, indicam que os ciclos de vida das vedações em blocos cerâmicos apresentam maiores danos ambientais. Os resultados do gráfico da figura 5.35, indicam que estes materiais liberam uma quantidade considerável de substâncias inorgânicas respiráveis e de gases responsáveis pelas mudanças climáticas. Conforme ilustrado na figura 5.33, os ciclos de vida dos envelopes construtivos com blocos cerâmicos apresentam maiores pesos ambientais nos grupos de danos à saúde humana e a qualidades dos ecossistemas. De acordo com a análise da rede de processos de fabricação do bloco cerâmico, figura 5.18, a justificativa para este fato deve-se as emissões atmosféricas liberadas durante a queima do produto por ser o processo que apresenta maior carga ambiental durante a fabricação do material.

Os ciclos de vida das envoltórias em blocos de concreto apresentam um peso ambiental superior referente a extração de combustíveis fósseis (figura 5.35). Como visualizado na figura 5.15 e 5.22, nos dados de entrada referentes ao processo de fabricação de 1kg de bloco de concreto e à montagem da envoltória com este componente construtivo, foi possível verificar que é utilizado uma maior diversidade e quantidade em massa de recursos naturais como brita, areia e cimento nestes processos, acarretando maior impacto ambiental para o grupo de danos referente a extração de recursos naturais.

As análises comparativas dos ciclos de vida de envoltórias, considerando como unidade funcional o desempenho térmico do sistema de vedação de uma tipologia residencial, de 42m², situada em Belo Horizonte, indicaram que os painéis de vedação em blocos de concreto, sempre acarretam maiores danos em todos os grupos de impacto, como verificado nas figuras 5.34 e 5.36. A quantidade de massa de reboco, necessária para aumentar a massa térmica destas envoltórias, foi a responsável por este resultado, principalmente pela presença do processo de produção de cimento que apresenta alta carga ambiental e pelo crescimento expressivo da utilização de recursos extraídos da natureza para sua fabricação conforme verificado na rede do processo de fabricação do material na figura 5.20.

6. CONCLUSÕES

A comparação das simulações dos impactos ambientais dos sistemas de vedação, tomando-se como unidade funcional a envoltória de uma tipologia residencial, situada em Belo Horizonte, indica que os ciclos de vida das vedações em blocos cerâmicos apresentam maiores danos ambientais em consequência das emissões atmosféricas liberadas durante o processo de queima presente na etapa de fabricação das peças.

As análises comparativas dos ciclos de vida de envoltórias, considerando como unidade funcional o desempenho térmico do sistema de vedação de uma tipologia residencial situada em Belo Horizonte, indicaram que os painéis de vedação em blocos de concreto, sempre acarretam maiores danos em todos os grupos de impacto. A quantidade de massa de reboco, necessária para aumentar a massa térmica destas envoltórias, foi a responsável por este resultado, principalmente pela presença do processo de produção de cimento que apresenta alta carga ambiental e pelo crescimento expressivo da utilização de recursos extraídos da natureza para sua fabricação.

Considerando os resultados descritos acima, pode-se inferir que o mais adequado é a utilização de envoltórias compostas por painéis de blocos cerâmicos, pois o impacto ambiental verificado ao longo da vida útil da habitação será menor. Tal afirmativa se baseia na hipótese que em uma moradia de baixo conforto térmico para o usuário, haverá necessidade de instalação de ventiladores, refrigeradores e aquecedores de ar, demandando maior consumo de energia ao longo dos anos de vida útil da edificação, além dos impactos ambientais embutidos nos ciclos de vida de cada equipamento.

De forma mais ampla, os resultados mostram que a avaliação dos impactos ambientais de materiais de construção e sistemas construtivos ao longo de seus ciclos de vida devem apresentar um limite de pesquisa mais amplo, abrangendo a fase de uso dos mesmos e conseqüentemente evitando interpretações errôneas do ponto de vista ambiental. A inclusão da análise do desempenho térmico das envoltórias na pesquisa, permitiu enquadrá-la dentro de uma das estratégias necessárias para uma mais construção sustentável e analisar os danos ambientais gerados por uma falha na seleção dos materiais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMOÊDA, Rogério P.C. **Ecologia dos Materiais de Construção – Linhas de Orientação para seu Ensino**. 2004. 212p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Braga, Portugal.

ANALYSIS BIO 2.1.5. **Software Analysis BIO**. 1998. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/software/analysis-bio>>. Acesso em: Abril de 2011.

ANDREASI, W. A. **Avaliação do impacto de estratégias bioclimáticas na temperatura interna de edificações no Passo do Lontra, Pantanal do Estado de Mato Grosso do Sul**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. 146p.

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. New York, USA, 1993.

ASSIS, E. S. ; PEREIRA, E. M. D.; SOUZA R. V. G. ; DINIZ, A. S. A. C. . **Habitação social e eficiência energética: um protótipo para o clima de Belo Horizonte**. In: II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2007, Vitória. Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Vitória : Associação Brasileira de Eficiência Energética (ABEE)/Grupo de Eficiência Energética da UFES, 2007. v. 1. p. 1-7.

ASSIS, E. S. ; RAMOS, J. G. L. ; CORTIZO, E. C. ; VELOSO, A. C. O. ; AMARAL, D. O. ; LUTKENHAUS, F. L. F. ; ASPAHAN, R. R. **Princípios de sustentabilidade aplicados em projeto habitacional de interesse social**. In: I Seminário de História e de Tecnologia da Habitação, 2008, Itatiba, SP. I SEHTHAB - Pesquisa em Habitação: desafios e perspectivas. Itatiba, SP : Editora Universitária São Francisco, 2008. v. 1. p. 1-1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270 -2**: Componentes cerâmicos. Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6163**: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientação. Rio de Janeiro, 2009.

BARBOSA, M. J. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação e Especificação do Desempenho Térmico de Edificações Térreas Unifamiliares**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. 307p.

BARBOSA, M.J. & LAMBERTS, R. **Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares, aplicada em Londrina-PR**. In: Ambiente Construído, Porto Alegre, jan-mar 2002. v. 2, n. 1, p.15- 28.

BRAGA, L.C. **Estudo de aspectos de eficiência energética de edificações com uma abordagem de automação predial**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. 165p.

BRASIL, Ministério das Cidades. 2010. Disponível em: www.cidades.gov.br. Acesso em: agosto 2010.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential**. Building And Environment: The International Journal of Building Science and its Applications, Zaragoza, Spain, n. 46, p.1133-1140, 09 dez. 2010. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/buildenv>. Acesso em: fevereiro 2011.

BUENO C. **Avaliação de desempenho ambiental de edificações habitacionais: Análise comparativa dos sistemas de certificação no contexto brasileiro**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.123p.

CADERNOS CAIXA. **Projeto padrão – casas populares | 42m²**. Vitória, Espírito Santo, 2007. 42 p.

CARVALHO, P. G. C. A. **Aplicação do Programa SimaPro na Avaliação do Impacto Ambiental causado na Produção e Exploração Offshore de Petróleo**. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural, Escola de Química, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 76p.

CASAGRANDE JUNIOR, E. F. **Princípios e Parâmetros para a Construção Sustentável**. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/>>. Acesso em: 23 abr. 2011.

CBCS. **Impactos da Construção**. Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/>>. Acesso em: fevereiro de 2011.

CIRAIG - The Interuniversity Research Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services. **Cycle de vie d'un Produit**. Disponível em: <http://www.ciraig.org/en/publications_e.html/>. Acesso em: Setembro de 2009.

COLTRO, L. (Org.). **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Campinas: Cetea/ital, 2007. 75 p. Disponível em: <http://www.cetea.ital.sp.gov.br/figs/ACV_como_Instrumento_de_Gestao_CETEA.pdf>. Acesso em: setembro de 2009.

CIB - INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION - United Nations Environment Programme International Environmental Technology Centre UNEP-IETC. **Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries: A discussion document** Boutek Report No Bou/E0204, Pretória, CIB/UNEP-IETC. 2002.

DUMKE, E. M. S. **Avaliação do desempenho térmico em sistemas construtivos da Vila Tecnológica de Curitiba como subsídio para a escolha de tecnologias apropriadas em habitações de interesse social**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Tecnologia - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2002. 231p.

GAMA, A.G.C.O. **Análise Ambiental e Econômica da Produção de Tijolos**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010. 93p.

GARCIA, D. B.; RODRIGUES, F. C.; AGUILAR M. T. P. **Avaliação de Ciclo de Vida de um elemento estrutural - Pilar em aço x Pilar em concreto armado**. In: II Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida em Produtos e Serviços. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. p.303-307

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, 1992.

GOEDKOOOP, Mark; SPRIENSMA, Renilde. **The Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment**. Methodology Report, third edition. Pré Consultants BV. 2001. Disponível em: <www.pre.nl>.

JOHN, V.M. **Avaliação da vida útil de materiais, componentes e edifícios**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Porto Alegre. 1988. 130p.

JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a construção habitacional**. In: 58ª Reunião Anual da SBPC - Florianópolis, Santa Catarina. Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC, 2006.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. 102p.

JOHN, V.M.; ANGULO, S.C. **Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos**. Coletânea Habitare. Vol.4. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. 2003.

LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Software Transmitância**. 2002. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/transmitancia> >. Acesso em: Abril de 2011.

LAMBERTS, R. ; DUTRA, L. ; PEREIRA, F. O. R. . **Eficiência Energética na Arquitetura**. 1. ed. São Paulo: PW editores, 1997. v. 1. 192 p.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; ABREU, A.L.P.; CARLO, J.C.; BATISTA, J.O.; MARINOSKI, D.L. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis, 2007. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>. Acesso em: maio de 2010.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A.A.P.; GOULART,S. **Conforto e Stress Térmico**. Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>. Acesso em: maio de 2010.

LEÃO, M. **Desempenho térmico em habitações populares para regiões de clima tropical – Estudo de caso em Cuiabá-MT**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Física, Instituto de Ciências e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2006. 102p.

LIMA, F. L. N. **Proposição de metodologia de avaliação do impacto ambiental no desenvolvimento de projetos arquitetônicos.** Dissertação (Mestrado) - Núcleo de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 140 p.

LIBRELOTTO, D.R. **Análise do Ciclo de Vida de Edificações Residenciais.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. 2006. 173 p.

LOPES, R. J. F. ; OLIVEIRA, I. L. ; MATOS, S. N. **Tecnologia da Informação como ferramenta empresarial para a gestão ambiental.** In: XXII Congresso Internacional de Administração, 2009, Ponta Grossa. XXII ADM, 2009.

MARQUES, A. M. **Desempenho térmico de edificações unifamiliares de interesse social: estudo de casos em Imbituba – SC.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. 134p.

MASTELLA, D. V. **Comparação entre os processos de produção de blocos cerâmicos e de concreto para alvenaria estrutural, através da análise do ciclo de vida.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. 107p.

MATERIODESIGN. **ACV Análise do Ciclo de Vida Parte II.** Disponível em: <<http://materiodesign.blogspot.com/>>. Acesso em: setembro de 2009.

MEGGERS, F.; LEIBUNDGUT, H. **How to reduce CO₂ emissions with new construction technologies.** In: RUBY, I.; RUBY, A. (Ed.). Re-inventing Construction. [S.l.]: Ruby Press, 2010. p. 67–83.

MEIER, A.; OLOFSSON, T. ; LAMBERTS, R. . What is an Energy - Efficient Building. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2002, Foz do Iguaçu. ENTAC 2002. v. 1. p. 3-12.

MENEZES, M.S. **Avaliação do desempenho térmico de habitações sociais de Passo Fundo – RS.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006. 130p.

MORENO, A. C. R. **Análise de desempenho térmico de Habitação de interesse social em Montes Claros - MG.** Monografia (Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados) - Escola de Arquitetura da UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MORISHITA, C.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS R. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas**. LABEEE, UFSC, Florianópolis, 2010.

OBRECOM. **Materiais de construção que respeitam a natureza**. Disponível em: <<http://www.obrecom.com.br/Portf%C3%B3lio.php>>. Acesso em: abril de 2011.

OLIVEIRA, A. S. **Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 118p.

OLIVEIRA, A.S. ; NOGUEIRA, M.C.J.A ; DE MUSIS, C. R. ; SANTOS, F.M.M. ; NOGUEIRA, J.S. **Avaliação do conforto térmico de habitações de interesse social em Cuiabá-MT**. Uniciências (UNIC), v. 12, p. 9-21, 2008.

PAPST, A. L. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999. 165 p.

REDAÇÃO AECWEB (Ed.). **Inércia térmica, a chave do conforto**. Disponível em: <<http://www.aecweb.com.br/inercia-termica-a-chave-do-conforto/tematicos/artigos/1499/6>>. Acesso em: Janeiro de 2011.

RODRIGUES, C. R.; ZOLDAN, M. A.; LEITE, M. L. G.; OLIVEIRA, I. L. **Sistemas Computacionais de Apoio a Ferramenta Análise de Ciclo de vida do Produto (ACV)**. In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção- A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008.

RORIZ, M. ; GHISI, E. ; LAMBERTS, R. **Uma proposta de Norma Técnica Brasileira sobre Desempenho Térmico de Habitações Populares**. In: V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e II Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 1999, Fortaleza. ENCAC99. v. 1.

RIBEIRO, C. M.; GIANNETI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B.. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): Uma Ferramenta Importante da Ecologia Industrial**. Disponível em: <<http://www.hottopos.com/regeq12/art4.htm>>. Acesso em: outubro 2009.

SACHT, H. M. e ROSSIGNOLO, J. A . **Habitações térreas e multipavimentos de interesse social: avaliação de desempenho térmico para tipologias com vedações em alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto.** PARC - Pesquisa em arquitetura e construção, v. 1, p. 1-18, 2009.

SEQUEIRA, D. F. P. **Aplicação para controlo de um software de LCA através da sua COM interface.** Dissertação (Mestrado) - Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010. 99p.

SINDUSCON-MG *et al.* **Guia de Sustentabilidade na Construção**, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, J. G. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005. 257p.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, V. G. **Metodologias de Avaliação de desempenho ambiental de edifícios: estado atual e discussão metodológica.** 2007. Projeto FINEP – Universidade Estadual de Campinas. São Paulo.

SILVA, C. **Avaliação do Ciclo de Vida-Apresentação de um exemplo prático baseado na ferramenta SIMAPRO.** In: Seminário - Eco-Eficiência de Produtos e Sistemas de Processos: ACV e AFM. Lisboa, 2007.

SILVA, G.A. **Panorama da Avaliação do Ciclo de Vida.** In: Seminário Impacto da Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos para as Indústrias de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos. São Paulo, 28 de novembro de 2005 .

SOARES, S. R. (Org.). **Grupo de Pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).** Disponível em: <www.ciclodevida.ufsc.br/acv>. Acesso em: Janeiro de 2009.

SOARES, S. R. ; PEREIRA, S. W. . **Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2 -mai/jun, 2004.

SOUSA, S.R. **Normalização de Critérios Ambientais Aplicados à Avaliação do Ciclo de Vida**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. 87p.

SOUZA, C.A. **Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.101p.

STILPEN, D. V. S. **Eficiência Energética e Arquitetura Bioclimática – o Caso do Centro de Energia e Tecnologias Sustentáveis**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 293 p.

TAKEDA, A.. **Levantamento de Métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) e Análise Comparativa dos Métodos mais Utilizados**. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008. 387p.

TOZZI, R. F. **Estudo da influência do gerenciamento na geração dos resíduos da construção civil (RCC) – Estudo de caso de duas obras em Curitiba/PR**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. 117p.

TRAJANO, L. **Avaliação do ciclo de vida dos produtos derivados do cimento para habitações de interesse social**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2010. 98p.

ZZBR - Zoneamento Bioclimático do Brasil . **Classificação bioclimática das sedes dos municípios brasileiros e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, conforme a ABNT NBR 15220-3**. 2004. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/zabbr> >. Acesso em: Abril de 2011.