

**DEPLEÇÃO ABIÓTICA E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL
NO CICLO DE VIDA DE TELHADO VERDE COMPARATIVAMENTE
A UM TELHADO CONVENCIONAL**

JÚLIA SANTIAGO DE MATOS MONTEIRO LIRA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DEPLEÇÃO ABIÓTICA E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL
NO CICLO DE VIDA DE TELHADO VERDE COMPARATIVAMENTE
A UM TELHADO CONVENCIONAL**

JÚLIA SANTIAGO DE MATOS MONTEIRO LIRA

ORIENTADORA: ROSA MARIA SPOSTO

COORIENTADOR: THIAGO OLIVEIRA RODRIGUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**PUBLICAÇÃO: E.DM-04A/17
BRASÍLIA/DF: ABRIL - 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DEPLEÇÃO ABIÓTICA E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL
NO CICLO DE VIDA DE TELHADO VERDE COMPARATIVAMENTE
A UM TELHADO CONVENCIONAL**

JÚLIA SANTIAGO DE MATOS MONTEIRO LIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Profª Rosa Maria Sposto, Dra (UnB)
(Orientadora)

Profª Michele Tereza Marques Carvalho, Dra (UnB)
(Examinadora Interna)

Profª Andrea Parisi Kern, Dra (UNISINOS)
(Examinadora Externa)

Brasília/DF, 23 DE MARÇO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Lira, Júlia

Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional / Júlia Lira; orientadora Rosa Sposto; coorientador Thiago Rodrigues. -- Brasília, 2017.

120 p.

ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2017.

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.AC.V. 2. Telhado verde. 3. Depleção abiótica 4. Aquecimento global.

I. Sposto, Rosa, orient. II. Rodrigues, Thiago, coorient. III. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIRA, J. S. M. M. (2017). Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-04A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira

TÍTULO: Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional

GRAU: Mestre ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira
SQN 407, Bloco I, Apartamento 203 - Asa Norte
CEP: 70855-090 Brasília/DF - Brasil
e-mail: juliasantiago@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Muitas etapas ultrapassei e demasiados desafios enfrentei para que percebesse a hora certa que Deus queria me mostrar de realizar essa tão almejada conquista. Portanto, hoje agradeço primeiramente a Ele e seus eleitos, por me colocarem no lugar certo e com as pessoas certas.

Agradeço à UnB, em especial à CAPES pelo auxílio financeiro.

Agradeço aos professores e servidores do PECC, em especial à Eugênia, Michele e Bauer pelos ensinamentos durante o mestrado.

Minha jornada para o mestrado em Brasília foi muito enriquecedora. Mas sem o suporte humano da minha querida orientadora Prof^a Dra. Rosa Sposto não seria metade. Prof, vou ser eternamente grata por todas as orientações de trabalho, de disciplina, de word, de vida, de cafeteria, de escolhas. Aqui no mestrado, a senhora foi minha escolha mais certa, smile. Obrigada pela confiança.

Ao meu coorientador, Dr Thiago Oliveira Rodrigues meu obrigadão por ter me apresentado ao viciante mundo da ACV. Muitos projetos virão.

Agradeço aos professores da UFPI, que sempre me incentivaram e torceram por mim. Em especial Maria de Lourdes, Ana Lúcia, Paulo de Tarso, Pedro Wellington e Cleto.

Aos amigos que a UnB me deu: Francielle, obrigada por toda a amizade. Núbia, por toda ajuda. Mayara, por toda a espiritualidade. Renata, por toda a confiança. E Lucas, obrigada por toda a parceria, que não vai acabar tão cedo.

Não seria ninguém sem meus amados pais. Meu pai, meu amigo, meu careca lindo, que cegamente confia em mim e nas minhas escolhas. Ter você ao meu lado é motivador, pai. Minha mãezinha, minha rainha, que é a mãe e avó mais linda do mundo. Seu carinho, afeto e amor foram fundamentais pra mim. Amo muito vocês.

Agradeço infinitamente à minha irmã. Bebê, você foi um apoio gigantesco pra mim, como sempre. Não sou digna de ser um espelho pra você, mas pode acreditar que vou continuar me esforçando pra isso. Agradeço às minhas gatas. Filhotas, vocês não vão saber desse agradecimento, mas vocês sentem meu amor.

Ao apoio da minha família, em especial meu tio e padrinho, por não hesitar em me fornecer sua fundamental ajuda. Agradeço nesse momento aos meus primos, que vibraram em cada

vitória minha. Mas aqui deixo meu eterno e especial agradecimento à Layse e à Mirella. Vocês foram (e continuarão sendo) meu guia nessa jornada.

Como sozinha não se faz nada, eu tenho os melhores amigos do mundo, e alguns ainda se dizem meus fãs (loucos)! Cada um de vocês sabe do meu grande amor e eterna gratidão. Às minhas amigas de vida, de condomínio e de infância: Isa, Maíra, Amandabadio e Cibelle (com minha princesa Maroca) obrigada pelos abraços e sorrisos. Alinne Rosa, sua inesgotável confiança e parceria estarão comigo sempre. Estelinha, minha amiga da engenharia, do caranguejo, do bar e da vida toda, obrigada por toda a sua amizade e o acolhimento da sua família. Renato, obrigada não define, você é o meu maior incentivador.

À Luiza, agradeço de coração as infinitas ajudas nos artigos, nos masterchefs, nas noites de skol e calabresa, nos looks, nas compras do extra, nas horas de desespero (isoladas ou mútuas). É uma experiência muito boa dividir apartamento com você.

E, claro, Thiago. Moção, segui teus conselhos e deixei o melhor pro final. Obrigada pelo amor, pela companhia, pela ajuda, por dividir essa jornada comigo, não importando a distância. Obrigada por acreditar nas minhas escolhas, por aceitá-las também. Obrigada por arrancar os meus melhores sorrisos, mesmo em dias estressantes. Você sabe que esse diploma vai ser seu também.

"O não você já tem, então por que não tentar ?"

... até agora o homem se viu impedido de concretizar suas esperanças por ignorar os meios de realizá-las: mas, à medida que a sua ignorância vai desaparecendo, ele se torna cada vez mais capaz de transformar, no sentido que julga melhor, o seu meio ambiente, o seu meio social e o seu próprio ser ...

Bertrand Russell

RESUMO

DEPLEÇÃO ABIÓTICA E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL NO CICLO DE VIDA DE TELHADO VERDE COMPARATIVAMENTE A UM TELHADO CONVENCIONAL

Autora: Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira
Orientador: Dra. Rosa Maria Sposto
Coorientador: Dr. Thiago Oliveira Rodrigues
Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
Brasília, março de 2017

A indústria da construção civil consome recursos naturais (renováveis ou não) e contribui para o aumento das emissões de GEE. As estratégias para a produção de habitações mais ambientalmente sustentáveis têm sido alternativas cada vez mais aplicadas ao mercado da construção, concomitantemente com a preocupação mundial em conservação do meio ambiente. Considerando o tamanho do território nacional (5% da superfície terrestre), a contribuição do Brasil nas emissões globais de GEE é relativamente pequena, mas ainda assim é a sétima maior emissão do planeta. Diante do exposto, a responsabilidade do país em reduzir os impactos ambientais é crescente. Dessa forma, muitos materiais, componentes e sistemas foram desenvolvidos buscando tecnologias mais energeticamente eficientes e ainda menores impactos ambientais. O telhado verde é uma alternativa para reduzir os efeitos das ilhas de calor e do aquecimento global, proporcionando, especialmente, benefícios de conforto térmico, já que isso está bem embasado na literatura científica. No entanto, aspectos relacionados ao seu desempenho ambiental ainda são pouco estudados. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi analisar as categorias de impacto referentes a depleção abiótica (uso de recursos minerais e fósseis) e ao potencial de aquecimento global (emissões de CO₂-eq) de um telhado verde, incluindo todas as fases do seu ciclo de vida, utilizando a ACV em comparação com um telhado convencional constituído por laje de concreto armado e telhas cerâmicas para uma habitação em Brasília. A metodologia utilizada contou com o cálculo do *software GaBi 6*, de toda a ACV de berço ao túmulo. Na fase de uso, o consumo energético para utilização de condicionamento artificial foi quantificado pelo *software Design Builder*, e o valor resultante foi inserido no *GaBi* para transformação do consumo energético nas categorias de impacto escolhidas. O consumo energético na etapa operacional para condicionamento ambiental da edificação com telhado verde (TV) foi metade do que a mesma edificação com telhado convencional (TC). Com isso, observou-se a estreita relação da transmitância térmica com o consumo para condicionamento artificial. A fase de uso foi a que apresentou maior valor de depleção abiótica (combustíveis fósseis) e potencial de aquecimento global. A única exceção foi a depleção abiótica (uso de recursos naturais) do TV, em que a fase de pré-uso superou a fase de uso. O uso de telhas cerâmicas foi o maior responsável pelo elevado valor das categorias de impacto do TC. Em toda a ACV de berço ao túmulo, a substituição de uma cobertura convencional por uma cobertura em telhado verde se mostrou favorável, contribuindo para menores impactos ambientais.

Palavras-chave: ACV, telhado verde, depleção abiótica, aquecimento global.

ABSTRACT

ABIOTIC DEPLETION AND GLOBAL WARMING POTENTIAL IN THE LIFE CYCLE OF GREEN ROOF COMPARED TO CONVENTIONAL ROOF

Author: Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira
Supervisor: Dra. Rosa Maria Sposto
Cosupervisor: Dr. Thiago Oliveira Rodrigues
Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil
Brasília, march of 2017

The construction industry consumes natural resources (renewable or not) and contributes to the increase of GHG emissions. The strategies for the production of more sustainable dwelling have been alternatives increasingly applied to the construction market, simultaneously with the worldwide concern in conservation of the environment. Considering the size of the national territory (5% of the earth's surface), Brazil's contribution to global GHG emissions is relatively small, but it is still the seventh largest emission of the planet. Based on the above, the country's responsibility to reduce environmental impacts is increasing. In this way, many materials, components and systems were developed seeking more energy efficient technologies and even lower environmental impacts. The green roof is an alternative to reduce the effects of islands of heat and global warming, providing especially benefits of thermal comfort, as this is well grounded in the scientific literature. However, aspects related to its environmental performance are still poorly studied. In this context, the objective of this study was to analyze the impact categories related to abiotic depletion (mineral and fossil resource use) and to the global warming potential (CO₂-eq emissions) of a green roof, including all phases of its life cycle (LCA), compared to a conventional roof made of reinforced concrete slab and ceramic tiles for a dwelling in Brasilia. In the methodology it was used the software GaBi 6 for the calculation of the whole LCA from cradle to grave. In the use phase, the energy consumption for the use of artificial conditioning was quantified by the software Design Builder, and the resulting value was added in the GaBi to transform the energy consumption in the impact categories chosen. The energy consumption in the operational stage for environmental conditioning of the building with green roof (TV) was half that of the same building with conventional roof (TC). In which the close relation of the thermal transmittance with the consumption for artificial conditioning was observed. The use phase was the one with the highest value of abiotic depletion (fossil fuels) and global warming potential. The only exception was the abiotic depletion (use of natural resources) of the TV, in which the pre-use phase exceeded the phase of use. The use of ceramic tiles was mainly responsible for the high value of TC impact categories. Throughout the LCA from the cradle to the grave, the replacement of conventional coverage by green roof coverage proved to be favorable, contributing to lower environmental impacts.

Keywords: LCA, *green roof*, *abiotic depletion*, *global warming*.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	20
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 A CONSTRUÇÃO CIVIL E OS IMPACTOS DO CONSUMO DE ENERGIA E DAS EMISSÕES DE CO ₂	25
2.2 TELHADO VERDE	27
2.2.1 Tipos.....	30
2.2.2 Componentes.....	33
2.2.3 Contribuições ambientais, sociais e econômicas	35
2.2.4 Normatização e Legislação	37
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	40
2.3.1 Simplificações da ACV.....	41
2.3.2 Estrutura de uma ACV.....	42
2.3.3 Escolha do método de avaliação de impacto	48
2.3.4 Outros métodos de avaliação de impacto para realizar ACV.....	51
2.3.5 Identificação das categorias de impacto segundo o CML	53
2.3.6 Fases do ciclo de vida de um produto	58
2.4 ACV EM TELHADOS VERDES	61
3 METODOLOGIA	67
3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO.....	67
3.1.1 Fases da ACV de berço ao túmulo	69
3.1.2 Etapa operacional (EO).....	72
3.1.3 Unidade Funcional.....	74
3.1.4 Fronteiras do sistema.....	74
3.1.5 O sistema de telhado verde (TV)	75
3.1.6 O sistema de telhado convencional (TC).....	78
3.2 ETAPA 2: CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO	79
3.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	81
3.4 ETAPA 4: INTERPRETAÇÃO.....	83

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.1 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA: <i>SOFTWARE DESIGN BUILDER</i>	84
4.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	85
4.2.1 Resultado de depleção abiótica - uso de recursos naturais (kg Sb _{-eq})	88
4.2.2 Resultado de depleção abiótica - uso de combustíveis fósseis (MJ)	91
4.2.3 Resultado de potencial de aquecimento global (kg CO _{2-eg})	94
4.2.4 Resultado geral por etapa de ACV	97
4.2.5 Discussões relevantes	99
5 CONCLUSÃO	101
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICE A: PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS DO TELHADO VERDE.	114
APÊNDICE B: PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS DO TELHADO CONVENCIONAL.	116
ANEXO A: FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE TELHADO VERDE (TV) NO <i>SOFTWARE GABI</i>.	119
ANEXO B: FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE TELHADO CONVENCIONAL (TC) NO <i>SOFTWARE GABI</i>.	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta interna de energia elétrica por fonte.	26
Figura 2: Jardins suspensos da Babilônia.	28
Figura 3: Sítio arqueológico em L'Anse aux Meadows localizado em Terra Nova (Canadá).	28
Figura 4: Telhado jardim da Villa Savoye.	29
Figura 5: Terraço Jardim da sede do Ministério da Educação e Saúde do Rio de Janeiro.	29
Figura 6: Telhado verde intensivo no prédio da Prefeitura de São Paulo.	31
Figura 7: Telhado verde extensivo no prédio da escola Liceu francês em Brasília.	31
Figura 8: Telhado verde vernacular.	32
Figura 9: Sistema modular do Instituto Cidade Jardim.	33
Figura 10: Camadas constituintes do sistema telhado verde.	33
Figura 11: Estrutura de uma ACV.	43
Figura 12: Elementos da avaliação de impacto de uma ACV.	47
Figura 13: Exemplo de mecanismo ambiental (com aplicação da abordagem midpoint e endpoint).	49
Figura 14: Mecanismo ambiental.	49
Figura 15: Categorias de impacto nas abordagens midpoint e endpoint a partir do inventário de ciclo de vida (ICV).	50
Figura 16: Projeção da variação média da superfície da Terra de 1986 para 2005 e de 2081 para 2100.	56
Figura 17: Conversão dos GEE em CO ₂ -eq.	58
Figura 18: Fases de uma ACV.	60
Figura 19: Quantidade de fases da ACV consideradas nos artigos internacionais.	64
Figura 20: Etapas da metodologia utilizadas no estudo.	67
Figura 21: Habitação de interesse social utilizada como estudo de caso.	68
Figura 22: Variáveis do estudo.	69
Figura 23: Fronteiras da ACV em relação às fases abordadas.	69
Figura 24: Local hipotético da habitação considerada.	70
Figura 25: Sistema de telhado verde modular (TVM) utilizado na pesquisa.	75
Figura 26: Detalhe construtivo das vigas de madeira maciça no TV.	76
Figura 27: Suporte estrutural com vigas, fechamento em OSB e impermeabilização do telhado verde.	77
Figura 28: Fluxo de inputs e outputs da montagem do telhado verde.	77
Figura 29: Detalhe da cobertura convencional (TC).	78
Figura 30: Fluxo de inputs e outputs da montagem do telhado convencional.	78
Figura 31: Fluxo simplificado dos sistemas considerados na pesquisa.	79
Figura 32: Fluxograma simplificado ilustrando a leitura do software GaBi na ACV, como exemplo TV.	81
Figura 33: Equivalência do inventário para as categorias de impacto.	82
Figura 34: Modelo da habitação simulada no software.	84
Figura 35: Resultado de depleção abiótica (kg Sb _{-eq}) por fase dos sistemas.	90
Figura 36: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (kg Sb _{-eq}), em total absoluto.	91
Figura 37: Resultado de depleção abiótica (MJ) por fase dos sistemas.	93
Figura 38: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (MJ) em total absoluto.	93
Figura 39: Resultado de potencial de aquecimento global (kg CO ₂ -eq) por fase dos sistemas.	96
Figura 40: Resultado da ACV por fase na categoria potencial de aquecimento global (kg CO ₂ -eq) em total absoluto.	97
Figura 41: Resultado por etapa isolada da ACV na categoria depleção abiótica (kg Sb _{-eq}).	98
Figura 42: Resultado por etapa isolada da ACV na categoria depleção abiótica (MJ).	98
Figura 43: Resultado por etapa isolada da ACV na categoria potencial de aquecimento global (kg CO ₂ -eq).	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Contribuição para as emissões de GEE do setor industrial em 2010.	25
Tabela 2: Resumo dos trabalhos internacionais de ACV em Telhado Verde (TV).	65
Tabela 3: Detalhamento do que foi considerado em cada fase/etapa da ACV e a respectiva nomenclatura.	70
Tabela 4: Valores de transmitância e capacidade térmica.	73
Tabela 5: Fronteiras consideradas na ACV.	75
Tabela 6: Materiais e componentes dos sistemas de cobertura de telhado verde (TV) e telhado convencional (TC) estudados por unidade funcional (m ² de cobertura).	80
Tabela 7: Consumo energético para condicionamento artificial na EO por ano e por unidade funcional.	85
Tabela 8: Etapa de produção e execução dos sistemas TV e TC.	86
Tabela 9: Etapa operacional dos sistemas TV e TC.	86
Tabela 10: Etapa de manutenção dos sistemas TV e TC.	87
Tabela 11: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (kg Sb _{-eq}).	88
Tabela 12: Materiais que mais contribuíram na categoria depleção abiótica (kg Sb _{-eq}).	88
Tabela 13: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (MJ).	91
Tabela 14: Materiais que mais contribuíram na categoria depleção abiótica (MJ).	92
Tabela 15: Resultado da ACV por fase na categoria potencial de aquecimento global (kg CO _{2-eq}).	94
Tabela 16: Materiais que mais contribuíram na categoria potencial de aquecimento global (kg CO _{2-eq}).	95

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ACM - Alumínio Composto

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

ACV-m - Avaliação do Ciclo de Vida modular

ACVCO₂ - Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂

ACVE - Avaliação do Ciclo de Vida Energético

BEN - Balanço Energético Nacional

CML - Centre of Environmental Science - Leiden University

Ct - Capacidade térmica

DAP - Declaração ambiental de produto

DF - Disposição final

EI - Energia incorporada

EE - Etapa de execução

EM - Etapa de manutenção

EO - Etapa operacional

EP - Etapa de produção

ET - Etapa de transporte

GEE - Gases de Efeito Estufa

LabEEE - Laboratório de Energia e Eficiência Energética (UFSC)

LSF - *Light Steel Frame*

PDA - Potencial de depleção abiótica

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa

TC - Telhado convencional

TV - Telhado Verde

TVM - Telhado Verde Modular

U - Transmitância térmica

1 - INTRODUÇÃO

A crescente preocupação mundial com a escassez de recursos naturais, tais como a extração de minerais, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm sido, nos dias atuais, pauta importante de governos, da academia e do setor produtivo. O impacto gerado pelo setor da construção civil ganhou visibilidade acerca deste tema.

A depleção abiótica é uma categoria de impacto que está relacionada com a extração de minerais, representada pela equivalência de antimônio (Sb) no ciclo de vida, e o uso de combustíveis fósseis (MJ). O potencial de aquecimento global é medido pelas emissões de CO_{2-eq}, que são o total dos gases com capacidade de causar o efeito estufa e possuem, por este motivo, potencial para causar o aquecimento global.

A partir da Rio 92¹, criou-se uma agenda para a construção sustentável, onde foram estabelecidas diversas metas a serem cumpridas, tais como a redução de consumo energético e a minimização de GEE.

As emissões de gases poluentes totalizaram, em 2014, uma média de 2,4 tCO₂ por habitante no Brasil (BRASIL, 2015). Segundo dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2015), do Observatório do Clima, em 2014, o Brasil emitiu 1,558 bilhão de toneladas de CO_{2-eq}, uma redução de 0,9% em relação ao 1,571 bilhão de toneladas emitidas em 2013.

Considerando o tamanho do território nacional (5% da superfície terrestre), a contribuição do Brasil nas emissões globais de GEE é relativamente pequena, mas ainda assim é a sétima maior emissão do planeta (SEEG, 2016a). Diante do exposto, a responsabilidade do país em reduzir os impactos ambientais é crescente.

A COP-21 (Conferência do Clima da ONU), realizada em dezembro de 2015, foi um marco mundial para discussão e propostas para reduzir as emissões de carbono e conter os efeitos do aquecimento global (SEEG, 2016b). Nesse encontro, o Brasil já havia, em suas políticas internas, se comprometido em reduzir entre 36,1% e 38,9% das emissões de GEE até 2020

¹ Rio 92: Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em junho de 1992.

(BRASIL, 2013). Todos os setores deverão estar incluídos nestas propostas, inclusive aqueles referentes à indústria da construção civil.

Para estabelecer como se dará a implementação das obrigações assumidas em Paris, no ano de 2016, foi realizada a COP-22 em Marrakesh. A organização da conferência foi baseada no padrão ISO 20121: 2012 (Sistemas de Gestão para Sustentabilidade de Eventos) e suas ações relacionadas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa: de sua fonte (energia, por exemplo) e as relativas aos aspectos sociais. No caso brasileiro, políticas internas já permitem que o país se torne um dos primeiros dentre as dez maiores economias e os dez maiores emissores de gases de efeito estufa do mundo a ratificar novo tratado climático (SEEG, 2016b).

Em relação à energia e ao CO₂, a busca por edificações com longa vida útil e aumento do uso de eletroeletrônicos aumentou ainda mais o peso da fase operacional no desempenho global do edifício, principalmente nos países desenvolvidos e nos países em fase de desenvolvimento como o Brasil. Para minimizar este impacto, foram desenvolvidas tecnologias mais energeticamente eficientes e ainda o conceito de edifícios zero energia (*net zero energy building*). Portanto, nos países desenvolvidos, os percentuais de energia e CO₂ se tornaram mais expressivos na fase de pré-uso, que envolve a produção, o transporte de materiais e a etapa de construção (SILVA; SILVA, 2015).

No Brasil, ainda com o crescimento dos selos de certificação ambiental, há necessidade de maiores investimentos neste sentido, sendo a fase operacional a que ainda apresenta um percentual mais expressivo de consumo energético e emissões de CO₂.

Para Coma *et al.* (2016), a indústria da construção civil é um agente eficaz para alcançar a redução do consumo energético e de emissões de CO₂, objetivando a produção de edifícios mais sustentáveis com maior eficiência energética. Os edifícios com baixo teor de carbono têm sido considerados como uma estratégia importante para alcançar a conservação de energia e a redução das emissões de GEE (GAN *et al.*, 2017). Além disso, esta indústria possui expressa participação na extração de recursos, sejam eles renováveis ou não. Segundo Yellishetty *et al.* (2011), o esgotamento dos recursos abióticos pode levar a desequilíbrios sociais, econômicos e ambientais.

De acordo com Savi (2015), algumas tecnologias, tais como o telhado verde, têm sido empregadas para auxiliar a mitigação dos problemas de consumo energético elevado nas

edificações e a recorrência de inundações nos centros urbanos, já que contribui com a redução de superfícies impermeabilizadas que dificultam a drenagem.

Um telhado denominado verde difere de um convencional por possuir um substrato com vegetação (PERI *et al.*, 2012). É geralmente construído para melhorar o conforto térmico de um edifício, mas existem muitos outros benefícios que ele pode proporcionar, tais como: aumento da retenção de água, contribuindo para reaproveitamento e drenagem das águas pluviais, redução da ilha de calor urbana, redução da concentração de CO₂, absorção acústica, melhoramento estético das cidades, aumento da biodiversidade e redução da perda de habitat (KOSAREO; RIES, 2007; SAVI, 2015; BIACNHINI *et al.* 2012; COMA *et al.* 2016).

Apesar de alguns destes benefícios estarem embasados na literatura científica, o real potencial do telhado verde em relação à sustentabilidade ambiental, considerando todo o seu ciclo de vida, deve ser mensurado, dada a importância dos impactos decorrentes do uso dos recursos naturais (materiais, energia e água) e das emissões geradas nas várias fases do ciclo de vida, incluindo o pós-uso.

O perfil do desempenho ambiental de um produto ou processo também é um importante instrumento para a avaliação ambiental, e pode ser mensurado pela Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que considera várias categorias de impactos. De acordo com a ISO 14044: 2006, a ACV pode auxiliar também:

- Na identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em pontos específicos do seu ciclo de vida;
- No planejamento estratégico para tomada de decisões tanto na indústria, como nas organizações públicas;
- Na seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes;
- Como uma estratégia de marketing, como, por exemplo, na coleta e disponibilização das informações ambientais de um produto para o consumidor por meio de uma declaração ambiental de produto (DAP).

Neste estudo, o telhado verde foi escolhido como objeto de avaliação, com foco na depleção abiótica e potencial de aquecimento global (emissões de CO_{2-eq}), considerando-se o seu ciclo de vida. Ele apresenta subsídios para identificação e análises futuras das fases mais críticas do

ciclo, pré-uso ou operação, bem como o estabelecimento de minimização dos impactos por meio de especificações de materiais ou tecnologias mais adequadas energeticamente.

1.1 JUSTIFICATIVA

A preocupação com a escassez dos recursos naturais, a necessidade de aumento da eficiência energética e a minimização dos impactos ambientais negativos gerados pelas edificações têm levado os profissionais da construção civil e os demais agentes desta cadeia produtiva a se engajar cada vez mais na busca de inovação em produtos e processos mais sustentáveis. Por meio da avaliação do desempenho ambiental nas várias fases do ciclo de vida de um sistema construtivo, pode ser feito um balanço detalhado da matéria-prima, dos materiais constituintes e da energia, que entram no fluxo do processo, e das emissões geradas, na saída do processo, permitindo visualizar especificações mais adequadas do ponto de vista ambiental.

O sistema de telhado verde é uma alternativa interessante de ser estudada, conforme apontado anteriormente, que pode acarretar menor impacto ambiental do ponto de vista do uso de recursos e de emissões de CO₂. Não se têm na literatura nacional, até o momento, informações disponíveis quanto ao seu percentual de impacto no uso de energia, na fabricação e especialmente na fase de uso, e de emissões de CO₂ em relação ao telhado convencional de uma habitação.

Com isso, há necessidade de se responder qual é o seu desempenho em relação a estes impactos considerando as fases do ciclo de vida (pré-uso: com extração e fabricação de materiais e componentes, transporte e execução; uso: com manutenção, reparo e operação e pós-uso). A partir destes resultados, é possível propor melhorias nas fases mais críticas, indicando materiais ou processos favoráveis para atingir este objetivo.

Este estudo faz parte da linha de pesquisa "Gestão e Sustentabilidade" do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) que pertence ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB).

Neste contexto, já foram desenvolvidos vários trabalhos de Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) e de Emissões de CO₂, (ACVCO₂), a maioria deles em sistemas de

vedação vertical, tais como *steel frame*, vedações convencionais de bloco de concreto e cerâmico, paredes de concreto, alumínio composto e fachadas ventiladas:

- Nabut Neto (2011) aplicou a ACVE e ACVCO₂ na etapa de pré-uso, comparando um sistema de fachada convencional com o *light steel frame* (LSF);
- Gouveia (2012) quantificou a energia incorporada e emissões de CO₂ na fase de pré-uso com fachadas com painéis de alumínio composto (ACM). A autora apresentou um avanço, pois também avaliou o potencial de reciclagem do alumínio;
- Palácio (2013) aplicou a ACVE para o sistema de LSF, relacionado ao desempenho térmico para diferentes configurações do sistema, variando os isolantes térmicos e os acabamentos internos;
- Maciel (2013) estudou a ACVE na etapa de pré-uso e uso de uma edificação habitacional multifamiliar para três tipos de fachadas ventiladas. Foi o primeiro trabalho do programa que analisou a energia consumida na fase operacional, relacionada ao desempenho térmico dos sistemas e conforto térmico dos usuários, e a energia de manutenção dos materiais e componentes;
- Pedroso (2015) aplicou a ACVE em cinco sistemas construtivos, entre eles, o convencional com blocos cerâmicos e o LSF, para todas as etapas do ciclo de vida. O foco do trabalho foi a etapa de pós-uso, no processo de desconstrução dos sistemas, a partir de um programa experimental para o levantamento de energia. O autor desenvolveu um projeto habitacional padrão que está sendo utilizado em outros estudos e no presente trabalho;
- Caldas (2016) utilizou a ACVE e ACVCO₂ de berço ao túmulo de uma edificação padrão de Brasília - DF comparando o sistema de LSF com o sistema convencional. O autor correlacionou a ACV com o desempenho térmico;
- Caldeira (2016) comparou o consumo energético da telha termoacústica com núcleo de EPS e a telha cerâmica tipo Plan por meio de uma ACVE nas fases de pré-uso e uso (operação e manutenção). A autora concluiu que a laje de concreto aumentou significativamente o consumo de energia em 10% ao final da vida útil, mas a tipologia de telha não foi fator significativo.

Relacionado ao sistema de cobertura, foi desenvolvido, até o momento, apenas um trabalho na linha de pesquisa Gestão e Sustentabilidade do PECC (o de Caldeira, 2016). Observa-se, portanto, a necessidade exploratória de mais estudos relacionados aos sistemas de cobertura, como o proposto neste estudo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é analisar as categorias de impacto referentes à depleção abiótica e ao potencial de aquecimento global (emissões de CO₂-eq) de um telhado verde, nas fases do seu ciclo de vida, utilizando a ACV em comparação com um telhado convencional constituído por laje de concreto armado e telhas cerâmicas sobre estrutura de madeira para uma habitação de interesse social.

Os objetivos específicos são:

- Quantificar o consumo energético na fase operacional dos dois sistemas analisados, relacionando o desempenho ambiental dos sistemas com o impacto do desempenho térmico;
- Identificar a fase e/ou etapa com maior valor de depleção abiótica e potencial de aquecimento global;
- Identificar materiais responsáveis pelo aumento do valor de cada categoria de impacto, para possibilitar uma futura substituição dos mesmos, reduzindo sua contribuição;
- Definir materiais, dentro das camadas do telhado verde, que possam contribuir em maior parcela para a elevada carga ambiental da cobertura.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Vários impactos podem ser considerados no âmbito da edificação e de seus sistemas de cobertura, tais como aquecimento global (gases de efeito estufa - GEE), consumo de matérias-

primas não renováveis (depleção abiótica), acidificação, compostos orgânicos voláteis, poluição de solos, oceanos e ar, entre outros. Neste estudo, foram selecionados dois destes impactos para a análise: depleção abiótica e potencial de aquecimento global.

Devido a suas dimensões continentais, o Brasil é dividido em oito zonas bioclimáticas, que possuem características específicas e determinadas diretrizes construtivas. Como o comportamento em uso destes sistemas pode vir a apresentar resultados diferentes em cada uma destas zonas e há a necessidade de se avaliar o comportamento nesta fase, neste trabalho, foi considerada apenas a zona bioclimática 4 (referente a Brasília-DF).

O projeto selecionado no estudo é uma habitação popular, comumente utilizada em conjuntos habitacionais brasileiros. A escolha deste modelo foi devido ao mesmo ter sido utilizado nos trabalhos de Pedroso (2015), Caldas (2016) e Caldeira (2016).

O tipo de telhado verde considerado é o extensivo², por ser um tipo leve que requer baixa manutenção e possui mais praticidade na sua fabricação e montagem. O tipo intensivo é utilizado para agrupar vegetação de grande porte, com elevada espessura de substrato, mais periodicidade de manutenção e maior peso para a estrutura. Sendo assim, por se tratar de uma habitação de interesse social, optou-se pela utilização do tipo extensivo.

Como o telhado verde é, na sua execução, um sistema de montagem, foi desconsiderado o uso de equipamentos e materiais auxiliares. Portanto, na fase de pré-uso apenas as etapas de produção e de transporte foram consideradas, transporte que inclui o envio dos resíduos de execução para a disposição em aterro. Na fase de uso, o sequestro de carbono pela vegetação não foi contabilizado. A utilização da água usada na vegetação foi a única considerada. O sistema de coleta de água pluvial foi admitido constituído de tubo PVC e, por ser igual nos dois sistemas, foi desconsiderado para efeito de comparação.

No sistema convencional, o consumo energético na etapa de execução foi considerado, porém considerou-se apenas o consumo gerado pelo uso de equipamentos de adensamento do concreto. Materiais auxiliares, como escoras e fôrmas, foram desprezados.

Neste sistema o concreto foi considerado usinado, mas para inserção de dados no software de ACV, houve a necessidade de separação de seus materiais constituintes, como cimento, agregado graúdo e miúdo, seguindo traço recomendado no SINAPI (Caixa Econômica) para o concreto com igual resistência a compressão.

² Apresentado com maiores detalhes no item 2.2.1.

A Avaliação do Ciclo de Vida foi feita no *software GaBi professional* versão 6, no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (ENM/UnB).

Neste estudo, foi considerado apenas: o uso de recursos naturais e os combustíveis fósseis e emissões de CO_{2-eq}, conforme já mencionado, ou seja, foram contabilizados os impactos referentes ao uso de recursos (depleção abiótica) e as emissões de GEE (CO_{2-eq}), considerando-se as fases do ciclo de vida do berço ao túmulo: pré-uso, uso e pós-uso de um telhado verde. Os dados de pré-uso (incluindo transporte e instalação), manutenção e fim de vida foram obtidos por meio do *software GaBi 6*; por meio de simulação no *Design Builder* foram obtidos os dados de consumo energético na fase de uso. Para a fase de manutenção, foi considerada a vida útil de 50 anos (conforme recomendado pela ABNT NBR 15575: 2013) para a habitação analisada no estudo, e para os seus componentes, buscaram-se os valores obtidos na literatura nacional.

A etapa de produção foi extraída do banco de dados do *GaBi* e, quando necessário, adaptada à realidade brasileira. As especificações dos dados de entrada (materiais e/ou componentes), já contidas no *software*, diz respeito a uma ACV de berço ao portão (ANEXOS A e B).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para melhor explanação dos objetivos a serem alcançados, o texto foi dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada ao leitor a temática e justificativa, por meio da explicação mais abrangente, do contexto e dos objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica do tema, dividida em: um panorama dos impactos gerados pela indústria da construção civil, o conceito de Telhado Verde e de Avaliação do Ciclo de Vida e o estado da arte dos trabalhos de ACV em Telhado Verde existentes na literatura.

O terceiro capítulo trata da metodologia utilizada na pesquisa, com os detalhes assumidos nos sistemas construtivos analisados e em cada fase do ciclo de vida.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados analisados nas categorias de impacto: depleção abiótica e potencial de aquecimento global.

No quinto e último capítulo, são apresentados o resumo e as conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A indústria da construção civil e a produção de edificações consomem energia, recursos naturais (renováveis ou não) e contribuem para o aumento das emissões de GEE. As estratégias para a produção de habitações mais ambientalmente sustentáveis têm sido alternativas cada vez mais aplicadas ao mercado da construção, especialmente por meio de selos de certificação da sustentabilidade, como *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), Selo Casa Azul (Caixa Econômica Federal) e Processo AQUA-HQE (Alta Qualidade Ambiental)³, mas estes sistemas não contemplam a abordagem sistêmica do pensamento do ciclo de vida nos critérios obrigatórios.

A contribuição dos gases presentes na atmosfera para o efeito estufa é um parâmetro válido para conhecer os níveis de emissão associados a produtos e processos. A participação dos materiais e processos oriundos da construção civil no potencial para efeito estufa é relevante para o comprometimento deste setor na busca por edificações mais favoráveis ambientalmente. Como exemplo, pode-se citar a conclusão do estudo de Rivela *et al.* (2013), na qual o suporte estrutural do seu telhado verde (laje de concreto armado) correspondeu por mais da metade de todas as categorias de impacto analisadas. O alto valor da laje de concreto é identificado pelos autores como sendo causado pelo impacto da produção do cimento.

Em relação à escassez de recursos, esta não pode mais ser vista como uma ameaça remota, já que a era dos recursos abundantes acabou (YELLISHETTY *et al.*, 2011; SCHNEIDER *et al.*, 2015). Dessa forma, o acesso aos recursos abióticos e a sua oferta suficiente no futuro estão presentes nos debates atuais sobre desenvolvimento sustentável (SCHNEIDER *et al.*, 2015). O conhecimento da contribuição da construção civil nesta categoria se torna fundamental para garantir a oferta e evitar a escassez dos recursos naturais disponíveis na natureza.

O sistema de telhado verde, juntamente com os seus componentes e sua técnica de execução têm sido usados há milhares de anos, porém só há pouco tempo, a partir da era da arquitetura moderna, vêm sendo estudado com maior enfoque com as novas metas de redução dos impactos no meio ambiente.

³ Esses certificados consideram atributos e não o ciclo de vida da edificação.

Os impactos ambientais do telhado verde precisam ser avaliados, mesmo apesar dos benefícios desse sistema, em relação ao conforto térmico, já estarem consolidados na literatura.

Neste capítulo, os conceitos sobre telhado verde e ACV são abordados, além do estado da arte envolvendo ACV em telhados verdes, no âmbito nacional e internacional.

2.1 A CONSTRUÇÃO CIVIL E OS IMPACTOS DO CONSUMO DE ENERGIA E DAS EMISSÕES DE CO₂

Tavares (2006) enfatiza a elevada contribuição das edificações na emissão de gases de efeito estufa, na geração de resíduos e no elevado consumo energético. Segundo Silva; Silva (2015), a indústria da construção, em uma escala global, é responsável por 14% a 50% da extração de recursos naturais do planeta. O setor da construção civil consome, aproximadamente, metade das matérias-primas extraídas da natureza, mas o consumo de recursos naturais na extração de materiais é apenas o início do problema que se estende por todo o longo ciclo de vida das edificações (CBCS, 2014).

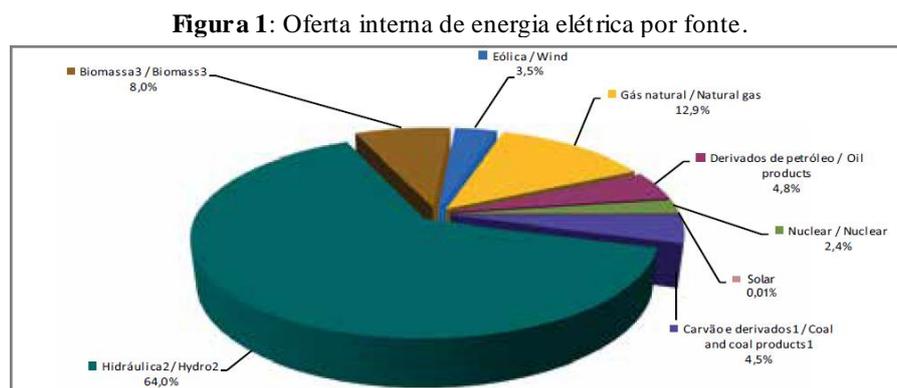
Dentro do setor industrial, observa-se, na Tabela 1, a contribuição de cada subsetor industrial em todas as emissões de GEE. A produção de aço e a produção do cimento correspondem, juntas, a cerca de 70% do valor total das emissões. Outra representação do setor da construção é o aumento da produção de cimento entre os anos de 2010 e 2012. Isso significa que uma intervenção neste setor se apresenta eficiente em termos de redução de emissões brasileiras.

Tabela 1: Contribuição dos subsetores para as emissões de GEE do setor industrial.

Subsetor industrial	2010	2012
Produção de Ferro-Gusa e Aço	46,10%	42,09%
Produção de Cimento	26,90%	29,60%
Produção de Cal	7,30%	7,70%
Uso de HFCs	6,70%	7,50%
Indústria Química	4,60%	4,00%
Produção de Alumínio	4,10%	3,90%
Outros usos do Calcário e da Dolomita	3,60%	3,70%
Uso da Barrilha	0,60%	0,40%
Uso de SF ₆	0,20%	0,20%

Fonte: Adaptado de Brasil, 2013 e 2014.

O relatório do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2016, com ano base 2015, divulgou a oferta brasileira de energia elétrica por fonte (Figura 1). A realidade do Brasil é que a maior fonte de geração energética é a hidráulica (64%), considerada fonte renovável. A energia eólica aumentou expressivamente sua oferta em relação ao ano base anterior (2014) que saiu de 2,0% para 3,5%. Este setor segue em expansão no país, já que está incluído no plano de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE) no qual o Brasil se comprometeu na COP-21.



Fonte: Relatório final do Balanço Energético Nacional, 2016.

Ainda considerando o Balanço Energético Nacional (BEN), a indústria da construção civil abrange o setor industrial propriamente dito (manufatura de cimento, aço, cerâmica, etc.) além do setor habitacional (durante a fase de uso da edificação). Segundo o relatório síntese do BEN de 2016, o setor industrial consumiu 32,5% da energia no Brasil e o setor residencial, 9,6%. Logo, pelo menos 42% do consumo energético brasileiro são oriundos da construção civil.

Esses dados, extraídos do BEN, se relacionam com dados já existentes na literatura, em que a construção civil como um todo consome de 30 a 40% da energia mundial e é responsável por cerca de 40% do consumo total de energia primária na União Europeia (CONTARINI *et al.*, 2015; COMA *et al.*, 2016).

No ano de 2015, as emissões mundiais de GEE totalizaram 53 bilhões de toneladas de CO₂-eq. Neste ano, o Brasil contribuiu com 1,92 Gt CO₂-eq, correspondente a 3,5% das emissões mundiais. Essa participação chegou a corresponder a 6% no ano de 2004 (SEEG, 2016a).

Apesar dos avanços recentes que apresentaram resultados favoráveis para as reduções das emissões brasileiras, as emissões per capita foram acima de 9 tCO₂-eq/habitante, em 2015, o que supera a média mundial, que é cerca de 7 tCO₂-eq/habitante (SEEG, 2016a).

A intensidade de carbono na produção de eletricidade no Brasil é menor que a média mundial em virtude da evolução da matriz energética brasileira de fonte renovável. Diferentemente do fato da maior parte da energia gerada no mundo ser proveniente de combustíveis fósseis que contribuem para uma grande quantidade de gases poluentes, especialmente o CO₂ (PAULSEN; SPOSTO, 2013).

Portanto, o país tem potencial para a redução das emissões de gases poluentes, favorecido pela sua matriz energética limpa. Silva; Silva (2015) afirmam que isso não influencia o consumo energético em si, mas reduz as emissões de CO₂ na fase operacional, novamente pela matriz brasileira renovável de fonte energética. Logo, este fato pode aumentar a parcela relativa à produção de materiais (pré-uso) dentro do total do ciclo de vida.

Especialmente na construção civil, o Brasil, sendo um país em desenvolvimento, não usufrui de todo o arsenal de tecnologias para racionalização e industrialização do processo construtivo, considerando as fases de produção de materiais e componentes e execução. Além disto, algumas tecnologias têm sido utilizadas para redução das emissões de GEE e do consumo de energia, como o telhado verde⁴.

É importante ressaltar que o telhado verde existe há muitos séculos (desde cerca de 500 a.C.), mas só a partir da arquitetura moderna voltou como uma tecnologia capaz de reabilitar estruturas, além de melhorar o conforto térmico interior da habitação e o microclima da região (WONG; LAU, 2013; BERARDI, 2016).

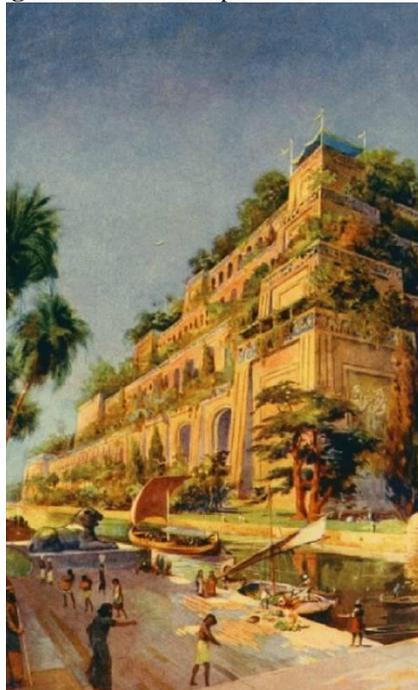
2.2 TELHADO VERDE

Pode ser denominado também como jardim suspenso, terraço jardim, teto verde, cobertura verde, cobertura vegetal e *green roof*. É um telhado antigo e primeiramente datado dos países do hemisfério norte, que possuem características de climas frios e baixas temperaturas.

Na região da antiga Mesopotâmia, as construções que comportavam jardins suspensos se chamavam Zigurates (conhecidos como jardins suspensos da Babilônia), como apresentado na Figura 2. Essas construções são datadas de cerca de 500 a.C.

⁴ Tecnologia, neste estudo, está ligada ao uso de técnicas que visam a resolução de problemas.

Figura 2: Jardins suspensos da Babilônia.



Fonte: Info Escola (2013). Disponível em: www.infoescola.com/historia/jardins-suspensos-da-babilonia.

Os *vikings* constam também como importantes construtores de telhados verdes (Figura 3). Conhecida como arquitetura sustentável *viking*, foi praticada séculos atrás. As casas eram feitas com pedras e madeiras locais e seus telhados eram cobertos por vegetação gramínea, que servia como um isolante natural, seguindo uma camuflagem natural.

Figura 3: Sítio arqueológico em *L'Anse aux Meadows* localizado em Terra Nova (Canadá).



Fonte: www.ecycle.com.br

A arquitetura moderna foi marcada pela atuação do arquiteto Le Corbusier no século XX, que criou os "cinco pontos para uma nova arquitetura". A aplicação dos cinco pontos é encontrada na Villa Savoye, criada em 1928, e reúne: o pilotis, o telhado jardim, o plano gratuito, as janelas de faixa e fachada livre. Em relação ao telhado jardim (Figura 4), a casa tem dois

telhados planos em diferentes níveis, um jardim suspenso no primeiro andar e um solário no segundo andar.

Figura 4: Telhado jardim da Villa Savoye.



Fonte: <http://www.villa-savoye.fr/en/>

Com o movimento da arquitetura moderna, o telhado verde, então, retornou com maior força a partir da década de 1960 na Alemanha. Um exemplo é a construção do aeroporto de Frankfurt, capital alemã, que foi construído no ano de 1990 e possui 40 mil m² de telhado verde. A construção reflete o desejo de conservação ecológica da terra, na medida em que se esforçam para causar o mínimo de impactos ambientais negativos (VELAZQUEZ, 2008).

De acordo com Ferraz (2012), o primeiro terraço jardim construído no Brasil, baseado no conceito de Le Corbusier, foi no Ministério da Educação e Saúde (Figura 5) no Rio de Janeiro, planejado pelo arquiteto Lúcio Costa⁵ no ano de 1936.

Figura 5: Terraço Jardim da sede do Ministério da Educação e Saúde do Rio de Janeiro.



Fonte: Acervo Lúcio Costa: www.jodim.org.

Desta forma, sendo uma tecnologia antiga que ganhou visibilidade nos últimos cem anos, Myrans (2009) afirma que a adoção de telhado verde é algo relativamente novo. Assim, essa tecnologia possui carência de normas técnicas e sofre, em geral, variações conforme a

⁵ Lúcio Costa foi o arquiteto responsável pelo projeto do planejamento de Brasília, a capital planejada do Brasil.

intervenção cultural. Alguns países com maior frequência e vivência deste tipo de cobertura criaram guias para orientar projetistas e usuários e suprir as lacunas da normatização, sendo alguns exemplos o Canadá, os Estados Unidos e a Alemanha. O conteúdo dos guias varia de benefícios a informações técnicas de materiais e aplicações.

2.2.1 Tipos

Telhado verde é um tipo de cobertura que possui um substrato (solo ou meio de cultura) com vegetação (PERI *et al.*, 2012; SILVA *et al.* 2016). Pode ser classificado segundo a espessura de substrato ou de acordo com sua execução.

Em relação à espessura de substrato, não há um padrão a ser seguido e vários autores possuem suas próprias especificações. Seguem as seguintes classificações:

O telhado verde intensivo é também conhecido como jardim vertical por possuir plantas de maior porte. São mais pesados e mais espessos (SILVA *et al.*, 2016). Possui espessura de substrato variando entre 15 e 50 cm (PEREIRA, 2014) e não pode ser executado em cobertura inclinada. Para Catalano *et al.* (2016) possui substrato com espessura maior que 20 cm e requer manutenção frequente e irrigação contínua. Silva *et al.* (2016) defendem a espessura do telhado verde intensivo variando de 15 a 70 cm. A ASTM 2777: 2014 considera que o uso de grandes plantas geralmente requer espessuras de substrato superiores a 15 cm, e na maioria dos casos, irrigação. Os telhados verdes intensivos exigem níveis de manutenção similares aos jardins enterrados. No Brasil, um importante exemplo de telhado verde intensivo está localizado no Edifício Matarazzo que é a sede administrativa da Prefeitura de São Paulo (Figura 6).

Figura 6: Telhado verde intensivo no prédio da Prefeitura de São Paulo.



Fonte: www.cidadedesapaulo.com.

O telhado verde extensivo é ideal para vegetação de pequeno porte, e, portanto, possui menor espessura. O valor da espessura do substrato de um telhado verde extensivo pode ser:

- Entre 8 e 12cm (TAVARES *et al.* 2014);
- Entre 6 e 15 cm (CATALANO *et al.*, 2016);
- Menor que 15 cm (ASTM 2777: 2014);
- Entre 6 e 25 cm (SILVA *et al.*, 2016).

O telhado verde extensivo requer baixa manutenção, precisa de uma camada de retenção de água, e é projetado para ser praticamente autossustentável com manutenção mínima exigida (BIANCHINI; HEWAGE, 2012; CÉRON-PALMA *et al.*, 2013; PEREIRA, 2014). Segundo a ASTM 2777: 2014, este telhado verde tipicamente utiliza vegetação de não lenhosas, ervas tolerantes à seca, grama, musgo e suculentas. Um exemplo de utilização de telhado verde extensivo é a escola Liceu Francês em Brasília (Figura 7).

Figura 7: Telhado verde extensivo no prédio da escola Liceu francês em Brasília.



Fonte: www.institutocidadejardim.com.br.

Semi-intensivo é um tipo intermediário de telhado verde com espessura de substrato variando entre 15 e 20 cm (CATALANO *et al.*, 2016). É composto por gramíneas e plantas de médio porte. A ASTM 2777: 2014 não reconhece essa classificação, assim como outros autores. Silva *et al.* (2016) afirmam apenas que essa classificação possui características intermediárias entre o extensivo e o intensivo.

O telhado verde extensivo, por ser mais leve e com baixa necessidade de manutenção, foi escolhido neste estudo. Em relação à sua execução, pode ser do tipo vernacular e do tipo modular, conforme explicado a seguir.

O tipo convencional de telhado verde amplamente difundido é conhecido como vernacular, constituído pela sobreposição de camada por camada acima do suporte estrutural. Um exemplo é apresentado na Figura 8.

Figura 8: Telhado verde vernacular.



Fonte: Rincón *et al.*, 2014.

Para facilidade de manutenção e uma execução racionalizada, o telhado verde modular vem ganhando grande aceitação no mercado. É composto por módulos que estão dispostos no telhado.

Este tipo de telhado possui um método para tornar o projeto e a instalação mais simplificados, sendo os módulos praticamente autossuficientes (LUCKETT, 2009). Um exemplo está apresentado na Figura 9, utilizado pelo Instituto Cidade Jardim, que é uma empresa brasileira especializada na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para telhados verdes e jardins suspensos.

Figura 9: Sistema modular do Instituto Cidade Jardim.

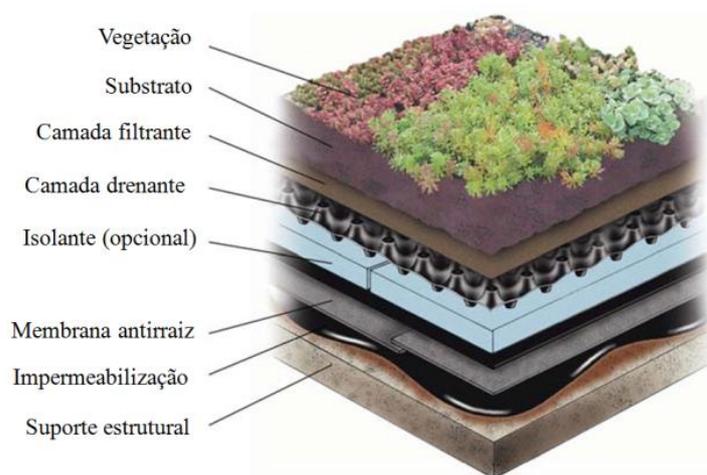


Fonte: Studio Cidade Jardim (www.studiocidadejardim.com.br).

2.2.2 Componentes

Necessita de camadas constituintes para efetivar o funcionamento do sistema. Deve ser composto por: suporte estrutural, camada impermeabilizante, membrana antirraiz para proteção da impermeabilização, camada drenante, camada filtrante e, por fim, o substrato com a vegetação (Figura 10).

Figura 10: Camadas constituintes do sistema telhado verde.



Fonte: Adaptado de Tolderlund, 2010.

O suporte estrutural é a camada responsável por suportar as cargas das camadas superiores. Em geral é aplicado sobre lajes planas de concreto armado, mas permite uma grande variedade nos sistemas de suporte estrutural e na inclinação.

A impermeabilização do suporte estrutural é fundamental para a maior durabilidade do sistema a uma possível invasão de umidade.

O suporte estrutural e a impermeabilização não compõem o telhado verde, segundo diversos autores. Porém, neste estudo, todo o sistema de cobertura será considerado como o telhado verde.

A membrana antirraiz possui a função de impedir que as raízes das plantas cresçam dentro ou através do sistema de cobertura. A barreira contra a penetração de raiz deve ser posicionada de forma a permitir o acesso das raízes das plantas à água retida. Barreiras de penetração de raiz devem ser camadas contínuas. Os sistemas de telhado que são identificados como resistentes à raiz e garantidos contra a penetração da raiz pelo fabricante podem ser instalados sem barreiras suplementares de penetração da raiz, como é o caso do telhado verde modular (ASTM 2777: 2014).

Isolante térmico é comumente utilizado nos países com clima mais frio para manter a temperatura interna e auxiliar no conforto térmico. Contarini; Meijer (2015) consideraram isolantes térmicos: poliestireno expandido, poliestireno extrudido, poliisocianurato, poliuretano, espuma rígida e lã de rocha.

A finalidade principal da camada drenante é remover o excesso de água do telhado e manter as condições aeróbicas no meio de telhado verde, segundo a ASTM 2777: 2014. Para que uma camada de drenagem seja eficaz, deve permitir que a água percole verticalmente na camada. No caso do sistema modular, as nervuras do módulo cumprem o papel da camada de drenagem e de retenção de água.

A camada filtrante tem por finalidade impedir que partículas de material de solo fino migrem para a camada de drenagem, causando entupimento ou redução da capacidade de drenagem da camada de drenagem (ASTM 2777: 2014). Os tecidos utilizados como filtro devem ter permissividade suficientemente elevada para permitir que a água se infiltre rapidamente na camada de drenagem subjacente. O substrato deve ser combinado com os tecidos para minimizar o potencial de obstrução. Deve ser instalada em conjunto com a camada de drenagem, podendo ser um conjunto único.

O objetivo do substrato é sustentar a vida das plantas durante um longo período de tempo, funcionar como reservatório de umidade, suportar drenagem eficiente durante eventos de chuva e proteger os componentes subjacentes do sistema de telhado verde. Em geral, as composições de um substrato requerem uma mistura de diferentes tamanhos e tipos de ingredientes minerais. O solo natural deve ser usado com cautela, devido ao seu teor de argila

e silte, bem como a carga potencial de sementes indesejadas, rizomas e potencial inoculação de patógenos. Os solos naturais são propensos à compactação quando instalados em camadas finas como parte de um sistema de telhado verde (ASTM 2777:2014).

Na pesquisa bibliográfica do estado da arte, a utilização de PVC, poliestireno, polietileno, polipropileno dominou as camadas de impermeabilização, barreira antirraiz e drenante. No caso da camada filtrante, houve um aumento da variedade de materiais, são eles: fibra de vidro, polietileno, fibras poliméricas e de poliéster, lã e argila expandida.

2.2.3 Contribuições ambientais, sociais e econômicas

Segundo a ASTM 2777:2014, as contribuições ambientais são:

- Qualidade do ar: sistemas de telhado verde captam partículas e retardam as taxas de reação de compostos orgânicos voláteis (COV)/óxidos de nitrogênio (NOX), que produzem ozônio no nível do solo;
- Sequestro de carbono: a vegetação do sistema de telhado verde sequestra carbono atmosférico. O efeito é limitado pela biomassa permanente adicionada ao sistema de telhado verde pela folhagem;
- Sistemas de gerenciamento de águas pluviais: interceptam precipitação nas camadas de substrato e vegetação e retornam uma porção desta água para a atmosfera através da evapotranspiração. Este efeito, que reduz o volume de escoamento, é mais proeminente nos meses quentes. Os sistemas de telhado verde também podem introduzir o armazenamento da detenção de águas pluviais e alongar os tempos de concentração. Estes efeitos posteriores são propriedades dinâmicas que são fortemente dependentes da capacidade de drenagem interna do sistema;
- Gestão da qualidade da água de escoamento: o potencial de sistemas de telhado verde para melhorar a qualidade da água de escoamento depende das condições do local, como a taxa de deposição atmosférica de partículas poluentes, os padrões de distribuição de chuvas e a presença ou ausência de sistemas combinados de esgoto;

- Proteção acústica: o substrato e a vegetação podem reduzir a reflexão sonora e transmissão de som, provavelmente em função da rugosidade da superfície e na maior parte independente da espessura ou massa do sistema;
- Mitigação do efeito de Ilha de Calor Urbano: o resfriamento evaporativo reduz a temperatura das superfícies do sistema de telhado verde e, portanto, pode influenciar as temperaturas externas nas proximidades. Além disso, ao melhorar a eficiência energética do envelope dos edifícios, o aquecimento do ar do ambiente externo através da descarga de calor residual dos sistemas HVAC pode ser reduzido;
- Eficiência Energética: o calor latente da evapotranspiração esfria as superfícies dos sistemas de telhado verde durante os meses quentes. Por outro lado, a energia térmica é liberada como água retida congela em meses frios;
- Criação de Habitat de Fauna: os telhados verdes podem fornecer um habitat para fauna local e migratória. No entanto, não devem ser considerados como um método de substituir ou preservar o habitat natural perdido. Com poucas exceções, o habitat do telhado difere no caráter e na qualidade do habitat nativo.

Além disso, a Norma inclui contribuições sociais: acesso ao espaço verde em áreas urbanas, ambientes terapêuticos, especialmente em instalações hospitalares e organizações comunitárias em torno de metas de educação, segurança alimentar e conservação da natureza.

As contribuições econômicas são: custo-benefício pela redução do consumo energético, possibilidade de combinação com sistema de esgoto, incentivos governamentais; vida útil da edificação, pois oferecem proteção à camada de impermeabilização e opções de reuso, como o substrato e os módulos.

Coma *et al.* (2016) estudaram o uso de telhado verde extensivo como ferramenta passiva de economia de energia em edificações. O experimento foi realizado com a utilização de três protótipos cúbicos de 1 m³, na Espanha, com fundação de concreto armado e paredes de bloco cerâmico revestido externamente de gesso e internamente de argamassa de cimento. Os autores concluíram que telhados verdes extensivos, especialmente com fragmentos de borracha reciclada como camada de drenagem, são uma boa ferramenta para economia de energia durante os períodos de verão. Houve uma redução expressiva no consumo energético de condicionamento para conforto térmico nos sistemas de telhado verde, em relação ao sistema de referência.

Rincon *et al.* (2014) também analisaram a camada de drenagem com borracha reciclada de um telhado verde extensivo, que foi o mais vantajoso, em relação ao desempenho ambiental, quando comparado com outros tipos de telhado verde.

Berardi (2016) analisou a utilização de telhado verde para *retrofit* do campus de uma universidade em Toronto, a fim de exemplificar os benefícios energéticos e microclimáticos do sistema. A adoção de um *retrofit* de telhado verde resultou em uma redução na demanda de energia de 3%, e em uma significável melhora nos níveis de conforto interno no piso abaixo do telhado verde. Foram encontradas reduções máximas da temperatura do ar de 0,4 °C e 0,8 °C durante o dia e de 1,1 °C e 2,0 °C à noite.

A escolha do telhado neste estudo pode contribuir para a busca de materiais que são mais impactantes nos sistemas de cobertura e sua substituição por produtos alternativos de menor carga ambiental. Mesmo porque, a mudança das estratégias de aquisição para materiais ecológicos desempenha um papel importante na redução do carbono incorporado em edifícios, conforme afirma Gan *et al.*, 2017. Ou seja, acrescentar materiais efetivamente sustentáveis para compor um sistema, que já apresenta contribuições positivas, amplia seu caráter de ser mais ambientalmente favorável ao meio.

2.2.4 Normatização e Legislação

No âmbito internacional, em se tratando de normas técnicas relacionadas a telhados verdes, podem ser citadas as da sociedade americana (*American Society for Testing and Materials - ASTM*). São elas:

- ASTM E 2396 (2011): métodos de ensaio para permeabilidade à água saturada;
- ASTM E 2397 (2011): práticas para determinação de cargas permanentes e móveis associadas ao telhado verde;
- ASTM E 2398 (2011): métodos de ensaio para captura de água e retenção do substrato de camadas geocompostas de drenagem;
- ASTM E 2399 (2011): métodos de ensaio para determinação da densidade máxima do substrato para estimar as cargas permanentes;

- ASTM E 2400 (2015): guia para seleção, instalação e manutenção de plantas no telhado verde;
- ASTM E 2777 (2014): guia normativo para sistemas de telhado verde;
- ASTM E 2788 (2011): especificação para uso de agregado (xisto, argila e ardósia) expandido como um componente mineral no substrato e na camada de drenagem.

Em termos de orientação sobre o sistema, se destacam os guias, inclusive a ASTM E 2777 que identifica terminologia, princípios e conceitos fundamentais, incluindo os relacionados com a sustentabilidade, requisitos técnicos de construção e tipos de sistemas de telhado verde utilizados em edifícios. Este guia aborda sistemas intensivos e extensivos de telhados verdes para telhados com até 15% de inclinação. As membranas, a impermeabilização e o isolamento para telhados são componentes-chave dos sistemas de telhado verde, mas os requisitos técnicos relativos às suas funções nesses sistemas não estão incluídos no guia.

Em alguns países, o uso de guias de telhado verde é mais comum, tais como Austrália, Canadá, Alemanha, EUA, China, Cingapura e Reino Unido. São guias explicativos e que podem conter diretrizes para os tipos de telhados verdes, os vários tipos de vegetação, os requisitos para a técnica construtiva e manutenção.

A associação internacional de telhado verde (*International Green Roof Association - IGRA*) é uma rede global para a promoção e divulgação de informações sobre telhado verde. Os membros da IGRA são organizações nacionais do telhado verde, institutos de pesquisa e companhias. A rede possui, em sua plataforma virtual, diversos documentos de caráter informativo, além do próprio guia: "*A Quick Guide to Green Roofs*" (2008).

O Brasil não possui nenhum guia ou orientação para a tecnologia de telhado verde, mas possui legislação sobre o seu uso, ainda que incipiente. O estado de Santa Catarina criou o Programa estadual de incentivo à adoção de telhados verdes por meio da Lei N° 14.243 (11 de dezembro de 2007).

Em relação à obrigatoriedade desse sistema, a Lei de N° 18.112 /2015, de Recife, que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade também da construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem. Essa Lei estabelece a obrigatoriedade do uso de telhados verdes para projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não

habitacionais com mais de 400 m² de área de coberta, sob pena da não aprovação da edificação.

A Lei N° 6888 (2016) do Estado do Piauí determina o emprego de técnicas sustentáveis de construção civil nas obras executadas pelo Estado do Piauí ou com recursos financeiros a qualquer título vinculado ao tesouro estadual. Uma das técnicas expostas na Lei é a solução de coberturas ou de telhados verdes, ecologicamente apropriados. Além disso, a Lei determina a utilização também de produtos que comprovadamente não tenham agredido o meio ambiente em seu processo produtivo (ACV).

A Lei N° 16277 (2015) da cidade de São Paulo, enquanto projeto de lei, tratava da obrigatoriedade do uso de telhado verde em determinadas edificações. No ato de sua aprovação, o prefeito vetou esse artigo, ficando apenas a intenção da prefeitura em beneficiar os cidadãos que optem por esse sistema em suas coberturas.

Em 2011, o Projeto de Lei N° 1703 (2011) buscava conceder desconto de 5% no IPTU para os habitantes de cidades com mais de 500 mil pessoas que implantassem coberturas verdes em 50% de seus telhados. O projeto não teve seguimento e o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) se posicionou, através de um parecer, sobre projeto. Apesar de ser favorável ao sistema de Telhado Verde, já que "contribui com a melhoria do conforto e da saúde humanos e com a redução do consumo de energia nos edifícios", pode-se considerar que a sua obrigatoriedade em todo o território nacional é pouco sustentável, pois:

- Existem várias opções para a prática de eficiência energética e melhoria do conforto em edifícios;
- Poucos fornecedores no país relacionados ao sistema em questão;
- Telhados mal instalados trazem consequências negativas para a saúde humana;
- Exigem projetos e execução mais elaborados, aumentando o custo da obra;
- Requerem permanente manutenção;
- Aumento nos custos do ciclo de vida do telhado, se comparado a outras soluções, em relação a estudos nos EUA;
- A vida das plantas depende da precipitação, e caso seja insuficiente há a necessidade de irrigação constante, indo de encontro com a economia de água;

- Os benefícios dos tetos verdes para a mitigação dos gases do efeito estufa precisam ser demonstrados;
- Ausência de normas técnicas específicas (nacionais).

O documento do CBCS defende a obrigatoriedade da arborização urbana, uma solução barata e eficiente e que vem sendo abandonada (CBCS, 2014). Obviamente, todas as barreiras impostas pelo CBCS para a sustentabilidade do telhado verde podem ser confirmadas ou não com a intensificação de pesquisas sobre este sistema.

Isto posto, torna-se necessário mais estudos sobre os benefícios comprovados do telhado verde, em relação ao meio ambiente e a minimização de impactos negativos. Tais como: menor uso de energia elétrica nas habitações devido ao melhor desempenho térmico, e a menor emissão de gases poluentes, como o CO₂.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta ou metodologia que pode ser usada para avaliar o desempenho ambiental⁶ em todo o ciclo de vida de um processo, produto ou uma edificação e a quantificação dos impactos ambientais, considerando uma larga faixa de categorias destes impactos. Segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2014, a ACV é uma metodologia no qual o produto ou processo é avaliado em todo o seu ciclo de vida.

Por ser um estudo de elevada complexidade, a ACV foi substituída por versões simplificadas ou recortes, em que apenas uma categoria é analisada (quantificação de consumo energético ou emissões de CO₂, por exemplo). Chau *et al.* (2015) afirmam que esse foco dado à ACV facilita na busca de dados e na interpretação dos resultados.

⁶ Desempenho ambiental é, segundo EN 15804 (2013), o desempenho relacionado aos impactos e aspectos ambientais.

2.3.1 Simplificações da ACV

Os pesquisadores da construção civil aderiram usualmente às simplificações da ACV, seja Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE), Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂) ou Avaliação do Ciclo de Vida Modular (ACV-m), especialmente diante da complexidade de processos que envolvem o ciclo de vida das edificações.

Alguns estudos brasileiros relevantes merecem ser destacados em relação à ACVE. De acordo com Tavares (2006), a ACVE é uma abordagem em que todos os consumos energéticos de um produto ou processo são contabilizados. O autor utilizou-se do conceito de energia incorporada dos materiais, resultante dos insumos energéticos necessários para as etapas referentes ao processo de fabricação e transporte, as etapas de uso, manutenção e disposição final de resíduos.

Tavares (2006) identificou e quantificou a energia incorporada no ciclo de vida de cinco habitações típicas brasileiras. Os valores foram obtidos por meio de análise híbrida e análise estatística. Os resultados das habitações brasileiras ficaram em torno de 30% do total dos valores de trabalhos internacionais com similar escopo, porém evidenciando a diferença de consumo energético de regiões com climas distintos, o que ocasionou maior demanda de aparelhos de climatização nos exemplos internacionais.

Maciel (2013) também utilizou a ACVE para estudo de Fachadas Ventiladas no Distrito Federal, levantando, quantificando e analisando a energia incorporada no ciclo de vida de três tipologias de fachadas ventiladas (fachada ventilada de placas pétreas, fachada ventilada de porcelanato e fachada ventilada de alumínio composto) em uma edificação típica do plano piloto de Brasília, utilizando a metodologia de análise híbrida com dados secundários, já existentes na literatura nacional.

Pedroso (2015) elaborou uma ACVE de berço ao túmulo de sistemas de vedação típicos brasileiros (vedações de concreto moldadas no local, alvenaria estrutural de blocos de concreto, *steel frame* e convencional). O autor utilizou-se de análise híbrida e para a fase de desconstrução realizou ensaios em protótipos para coletar dados primários e concluiu que a vedação em alvenaria estrutural apresentou menor energia incorporada total (em toda a ACVE). A partir da análise dos resíduos das vedações na etapa de desconstrução, o autor determinou que os resíduos podem representar de 6% até 11% da EI total.

Com a evolução das pesquisas no ciclo de vida de edificações completas e/ou materiais que as compõem, os pesquisadores da construção civil passaram a relacionar o consumo energético com as emissões de CO₂. Tavares (2006) chegou a introduzir essa abordagem. Lobo (2010) elaborou um inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia incorporada. A intenção do autor foi demonstrar um método para o cálculo dos dois parâmetros a partir de uma planilha de serviços de uma obra, entretanto, os dados lançados no seu trabalho ainda foram secundários.

A abordagem da quantificação e avaliação das emissões de CO₂ geradas nas fases do ciclo de vida de um material, sistema ou edificação é a Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂), que é mais recente e reconhecida internacionalmente (ATMACA; ATMACA, 2015; CHAU *et al.*, 2015).

No âmbito nacional, é válido citar Caldas (2016), que elaborou uma comparação de um sistema considerado inovador (*light steel frame*) com o convencional de vedação vertical em uma edificação habitacional unifamiliar em Brasília a partir da realização de uma ACVE e ACVCO₂. O autor utilizou valores mínimos, médios e máximos de dados secundários obtidos na literatura. Os sistemas não apresentaram diferença significativa no consumo de energia e emissões de CO₂.

A iniciativa de avaliação do ciclo de vida modular foi desenvolvida pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), visando criar uma plataforma de informações com indicadores de sustentabilidade de materiais, produtos e componentes para auxiliar profissionais e consumidores na tomada de decisão. Essa plataforma foi criada a partir do levantamento de dados de produção junto aos fabricantes. Na ACV-m, a metodologia de análise considera cinco aspectos: emissão de CO₂, consumo de energia, água e matérias-primas e geração de resíduos. Podem também ser acrescentadas informações como durabilidade, resistência, refletância, entre outras.

2.3.2 Estrutura de uma ACV

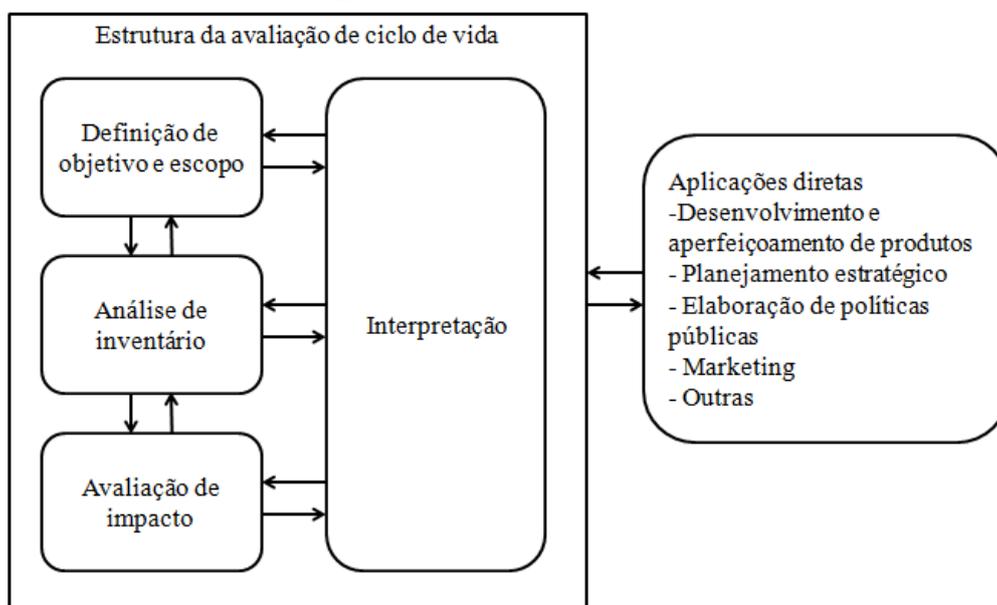
Segundo Silva; Silva (2015), o emprego da ACV amplia o escopo de análise de impacto para uma série de categorias, de maneira sistemática, e não apenas energia e emissões de GEE. O conceito de ciclo de vida vem sendo amplamente aplicado nas Declarações Ambientais de

Produto (DAP)⁷, que contém a quantificação de informações ambientais sobre o ciclo de vida de um produto para permitir comparações entre os produtos que cumprem a mesma função (ISO 14025:2010).

As DAPs fornecem os dados ambientais quantificados do produto utilizando parâmetros pré-determinados, que são baseados na norma ABNT NBR ISO 14040:2014 e na ISO 14025:2010. São documentos usualmente utilizados nos Estados Unidos e Alemanha, por exemplo. As DAPs são exemplos funcionais da aplicação da ACV em produtos ou processos da construção civil, no qual o Brasil apresenta um estágio embrionário⁸ em relação à utilização dessas declarações.

A estrutura típica de uma ACV, conforme apresentado na Figura 11, compreende quatro etapas (ABNT NBR ISO 14040:2014): definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. As aplicações diretas de uma ACV, também apresentadas na Figura 4, são: desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas, marketing, etc. Blengini; Di Carlo (2010) enfatizam a importância da abordagem da ACV na incorporação de políticas de redução de energia.

Figura 11: Estrutura de uma ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014.

⁷ Seu nome original: *Environmental Product Declaration (EPD)*.

⁸ As primeiras DAPs do país foram lançadas no ano de 2016 pela empresa Votorantim Cimentos.

Segundo Silva; Silva (2015), a definição do escopo (primeira etapa) é o estabelecimento do objetivo e as fronteiras do estudo, sua abrangência e profundidade. Para Chau *et al.* (2015), é nesta etapa que são definidos finalidade, objetivos e fronteiras do sistema. Seguindo as recomendações da ABNT NBR ISO 14040: 2014, para determinar os objetivos da ACV, deve-se saber:

- A aplicação pretendida;
- As razões para a realização do estudo;
- O público-alvo, ou seja, a quem a comunicação dos resultados do estudo se destina;
- Se os resultados serão utilizados em afirmações comparativas a serem divulgadas para o público.

O escopo deve estar bem definido para assegurar que a abrangência, a profundidade e os detalhes do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender aos objetivos adotados. O escopo inclui: o sistema do produto, as funções do sistema (ou sistemas, no caso de estudos comparativos), a unidade funcional, as fronteiras do sistema, os procedimentos de atribuição, as categorias de impacto selecionadas e as metodologias de avaliação de impacto e interpretação subsequentes a utilizar, os requisitos de dados, os pressupostos, as limitações, os requisitos iniciais de qualidade dos dados, o tipo de revisão crítica (se houver) e tipo e o formato do relatório exigido para o estudo, tudo isto conforme recomendado pela ABNT NBR ISO 14040: 2014.

É válido ressaltar que o escopo é um planejamento de toda a ACV a ser feita, podendo ser alterado conforme andamento do estudo. Ou seja, à medida que os dados e as informações são coletados, o escopo pode ser adaptado para atendimento ao objetivo proposto.

Alguns termos são de fundamental importância para o entendimento do escopo de uma ACV. A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas (características de desempenho) do produto. O objetivo principal de uma unidade funcional é fornecer uma referência para a qual as entradas e saídas estão relacionadas. Esta referência é necessária para assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV. Ou seja, é comum para o estudo de vedações verticais de edificações a escolha da unidade funcional em m² de vedação, facilitando a comparação com outros estudos de semelhante escopo.

Para isso, é importante determinar o fluxo de referência em cada sistema, de modo a cumprir a função pretendida, isto é, a quantidade de produtos necessários para cumprir a função. A descrição detalhada do fluxo de produção é a base para um bom andamento do estudo de ACV. Isso faz parte, inclusive, da definição das fronteiras da ACV.

Os critérios que são utilizados para definição das fronteiras são importantes para o grau de confiança nos resultados de um estudo e a possibilidade de atingir o objetivo proposto. De acordo com a ABNT NBR ISO 14040: 2014, ao definir o limite do sistema, vários estágios do ciclo de vida, processos unitários e fluxos devem ser levados em consideração, como por exemplo, entradas e saídas na principal sequência de fabricação (ou processamento).

A etapa de inventário do ciclo de vida (ICV) é a identificação e quantificação dos *inputs* (consumo de recursos) e *outputs* (emissões geradas) ambientais associados a um produto em todo o seu ciclo de vida. Segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2014, a análise de inventário envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo para quantificar entradas e saídas relevantes de um sistema de produto.

O processo de condução de uma análise de inventário é iterativo. À medida que os dados são coletados, podem ser identificados novos requisitos de dados ou limitações que exigem uma mudança nos procedimentos de coleta de dados para que os objetivos do estudo ainda sejam atingidos (ABNT NBR ISO 14040: 2014). Os dados para cada processo unitário dentro das fronteiras do sistema podem ser classificados em:

- Entradas de energia, insumos de matérias-primas, insumos auxiliares, outros insumos físicos;
- Produtos, coprodutos e resíduos;
- Emissões para o ar, descargas na água e no solo;
- Outros aspectos ambientais.

As descrições da qualidade dos dados são importantes para entender a confiabilidade dos resultados do estudo e interpretar corretamente o resultado.

A avaliação do impacto, terceira etapa, consiste em correlacionar os fluxos (*input-output*) a problemas ambientais em diferentes categorias, meio ambiente, saúde humana e uso de recursos. Ou seja, os impactos ambientais e os recursos de entrada são quantificados com base

na análise de inventário (CHAU *et al.*, 2015). De forma mais geral, os resultados numéricos do inventário são traduzidos para resultados ambientais (SAADE *et al.*, 2014).

Segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2014, este processo envolve, em geral, a associação de dados de inventário com categorias específicas de impacto ambiental e indicadores de categorias, tentando assim entender esses impactos. Essa etapa fornece informações para a quarta e última etapa de uma ACV: a de interpretação de resultados.

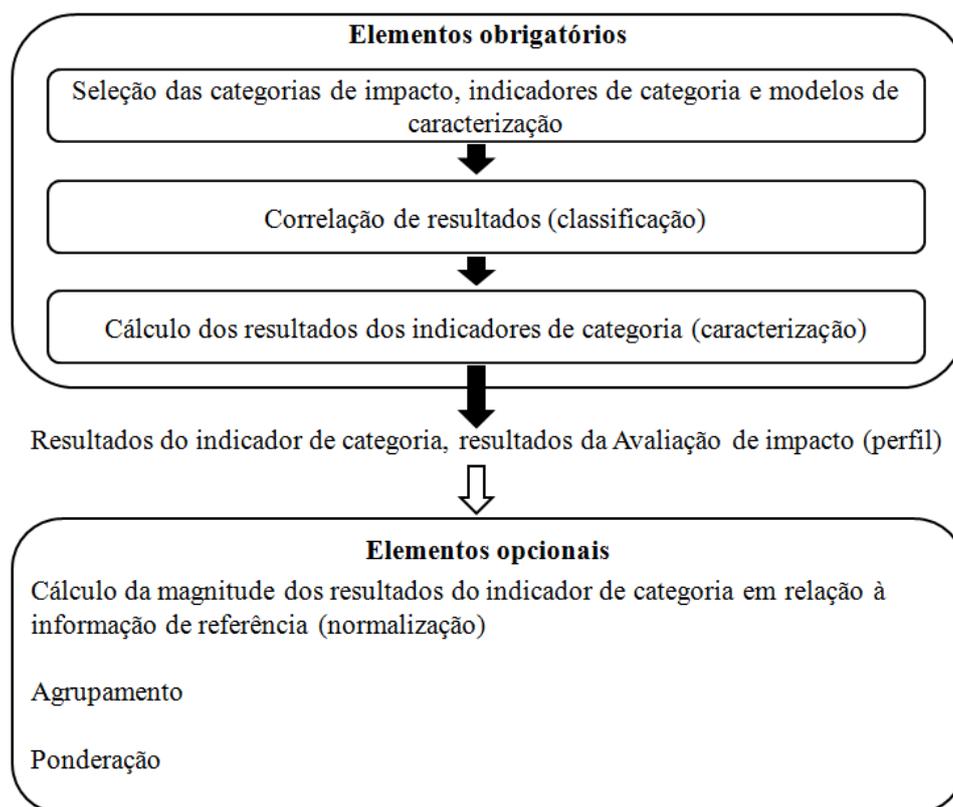
A etapa de avaliação pode incluir o processo de revisão do objetivo e do escopo do estudo para determinar se foram cumpridos ou para modificá-los no caso contrário. A escolha, a modelagem e a avaliação de categorias de impacto podem introduzir subjetividade nesta etapa. Por conseguinte, a transparência é fundamental para a avaliação do impacto, a fim de garantir que as hipóteses sejam claramente descritas e relatadas (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

As normas ISO subdividem esta etapa de avaliação em elementos obrigatórios e opcionais (Figura 12). A respeito destes elementos:

- Cada elemento é distinto e pode ser claramente definido;
- A etapa de definição de objetivo e escopo pode considerar cada elemento separadamente;
- Pode ser realizada uma avaliação da qualidade dos métodos de impacto para cada elemento;
- Os procedimentos, pressupostos e outras operações da avaliação de impacto em cada elemento podem se tornar transparentes para revisão crítica e relatórios.

Dos elementos obrigatórios, a classificação é a identificação da categoria de impacto associada a cada parâmetro inventariado como, por exemplo, mudanças climáticas. A caracterização é o cálculo dos indicadores de cada categoria de impacto⁹ usando fatores de caracterização, os quais são estimados usando modelos de caracterização.

⁹ Indicador de categoria de impacto é a representação quantificável de uma categoria de impacto (ISO 14044: 2006).

Figura 12: Elementos da avaliação de impacto de uma ACV.

Fonte: ABNT NBR ISO 14040: 2014.

Os elementos opcionais informam de forma mais abrangente o alcance da categoria de impacto, como se dissesse o indicador final de certo impacto. Dos elementos opcionais, a normalização é o cálculo da magnitude relativa de cada indicador de categoria de impacto em relação a uma informação de referência. A ponderação é a conversão dos resultados dos indicadores das diferentes categorias de impacto a uma escala comum, baseada em escolha de valores. Pode, inclusive, gerar um único indicador final para simplificação dos resultados. O agrupamento consiste em agrupar as diferentes categorias de impacto em um ou mais conjuntos, fornecendo, em muitos casos, uma pontuação única, de fácil divulgação, porém com considerável agregação de subjetividade e incerteza (SAADE *et al.*, 2014).

Segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2014, não existem metodologias geralmente aceitas para associar de forma consistente e precisa dados de inventário com potenciais impactos ambientais específicos, sendo que os modelos para categorias de impacto estão em diferentes estágios de desenvolvimento.

A etapa final, interpretação, consiste em interpretar os resultados calculados a partir da fase de avaliação de impacto e recomendar medidas de melhoria, conforme adequado. Segundo a

ABNT NBR ISO 14040: 2014, a interpretação é a etapa de ACV na qual os resultados da análise de inventário e a avaliação de impacto são considerados em conjunto. Esta etapa deve fornecer resultados consistentes com o objetivo e o escopo definidos e que cheguem a conclusões, expliquem limitações e forneçam recomendações.

Como a ACV é uma metodologia bastante complexa, a interpretação do ciclo de vida destina-se também a fornecer uma apresentação facilmente compreensível, completa e consistente dos resultados, de acordo com a definição de objetivo e escopo do estudo.

2.3.3 Escolha do método de avaliação de impacto

Para traduzir dados provenientes do inventário em categorias ambientais de impacto ($\text{CO}_2\text{-eq}$, valores de toxicidade humana, etc.) é preciso utilizar uma metodologia específica para realizar essa conversão ou esse cálculo. Essa metodologia é realizada pelos métodos de avaliação de impacto, e cada método tem sua própria maneira de conversão e utilizam determinadas abordagens (ou modelos) de caracterização. Quanto a estes modelos, cada um possui seus próprios princípios de medições e fatores de caracterização, normalização e ponderação (SAADE *et al.*, 2014).

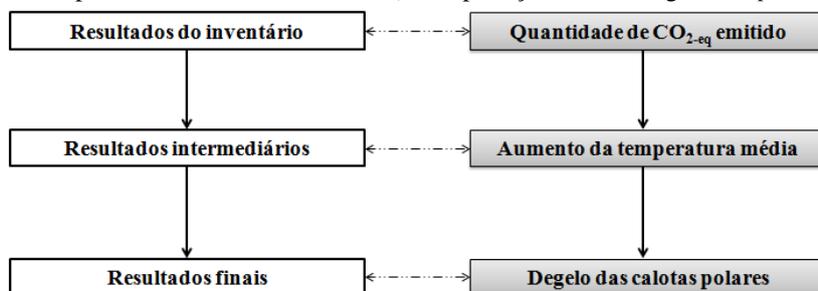
Em termos gerais, duas abordagens de caracterização podem ser aplicadas para quantificar os impactos ambientais: a abordagem orientada a problemas (*midpoint*) e a orientada a danos (*endpoint*) (CHAU *et al.*, 2015). Existe ainda uma abordagem combinada (MENDES, 2013), que mescla as vantagens das duas.

A abordagem *midpoint* usa valores no início ou no meio de um processo que estejam localizados no mecanismo ambiental e a abordagem *endpoint* considera todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final.

A abordagem *endpoint* pode ser calculada em uma única pontuação, facilitando a compreensão, mas diminuindo a transparência e aumentando muito as incertezas (CHAU *et al.*, 2015). Exemplo: aumento do número dos casos de câncer, provocados pelo aumento da exposição à radiação e degelo das calotas polares causado pelo aumento da temperatura média na superfície terrestre.

A etapa de avaliação de impacto, com seus respectivos exemplos, pode ser entendida, mais claramente, na Figura 13, com exemplo da abordagem *midpoint* (aumento da temperatura média na superfície terrestre) e *endpoint* (degelo das calotas polares), com o uso de valores no início ou no meio de um processo que estejam localizados no mecanismo ambiental¹⁰.

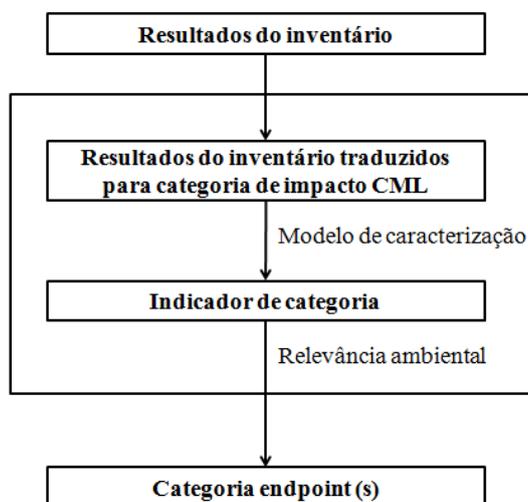
Figura 13: Exemplo de mecanismo ambiental (com aplicação da abordagem *midpoint* e *endpoint*).



Fonte: Autora.

Ou ainda conforme ilustrado na Figura 14, por meio da apresentação do mecanismo ambiental, neste caso com a aplicação dos modelos (ou abordagens) de caracterização.

Figura 14: Mecanismo ambiental.



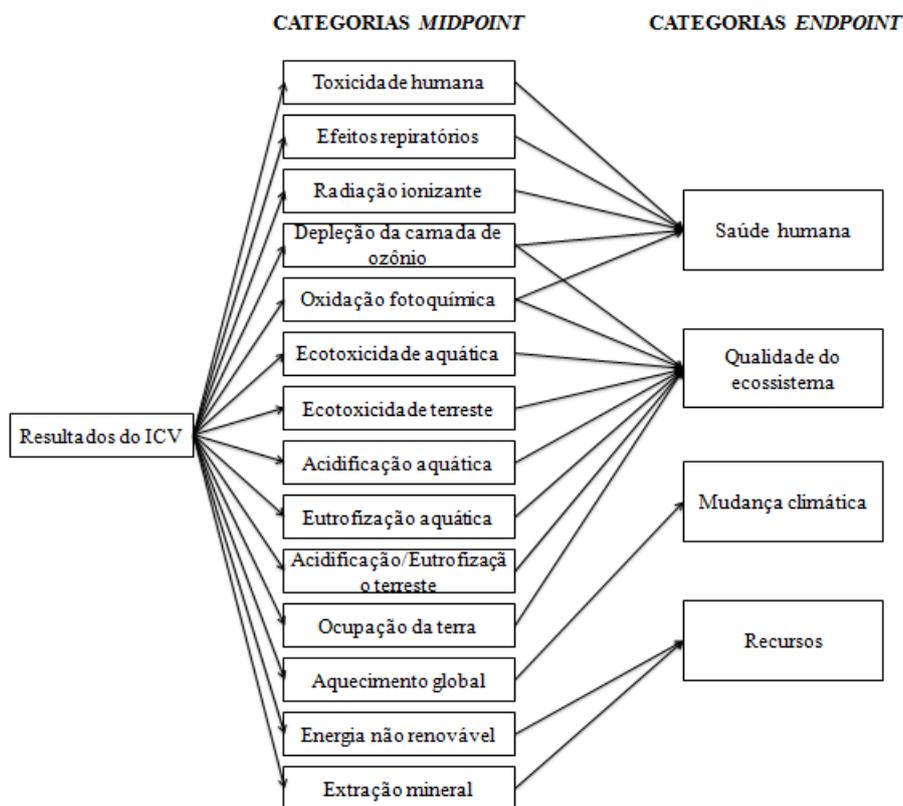
Fonte: Adaptado da ISO 14042: 2000.

Para Chau *et al.* (2015), a abordagem *midpoint* gera uma imagem mais completa dos impactos ecológicos, mas exige um bom conhecimento de ACV para interpretar os resultados. Exemplo: aumento dos níveis de radiação no ambiente e aumento da temperatura média.

¹⁰ Sistema de processos físicos, químicos e biológicos para uma dada categoria de impacto, vinculando os resultados de inventário para os indicadores de categoria (ISO 14042: 2000).

Os tipos de categorias de impacto considerados pelas abordagens *midpoint* e *endpoint* estão apresentados na Figura 15.

Figura 15: Categorias de impacto nas abordagens *midpoint* e *endpoint* a partir do inventário de ciclo de vida (ICV).



Fonte: Mendes, 2013.

Organizações e empresas em todo o mundo têm consolidado métodos específicos de avaliação de impacto, métodos esses que usam uma das abordagens citadas anteriormente. É notório que os principais métodos existentes no mercado utilizam uma das abordagens supracitadas (*midpoint*, *endpoint* e combinado). Mendes (2013) analisou as características e a aplicabilidade de alguns dos principais métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida, são eles: CML, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LUCAS, ReCiPe, entre outros.

Os *softwares* de ACV possuem sua própria base de dados para escolha dos materiais na etapa de inventário. No caso do *software GaBi*, o usuário pode escolher qual método de avaliação irá gerar os resultados no momento da compilação e, dependendo da escolha, qual categoria de impacto irá avaliar. No caso deste trabalho, o método CML 2001 foi escolhido dentro do *software GaBi*.

O CML ou *Dutch Handbook on LCA* é um manual holandês publicado em 2002 que apresenta diretrizes operacionais para a realização de um estudo passo a passo de ACV, com base nas normas ISO (Guinée *et al.*, 2002). Sua versão revisada é intitulada *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Esse método é baseado em uma abordagem *midpoint* e seus modelos de caracterização foram selecionados através de uma extensa revisão das metodologias existentes no mundo.

Segundo Mendes (2013), o CML apresenta um escopo de aplicação global e possui algumas características particulares:

- Fundamentos científicos explícitos que apoiam todas as escolhas importantes;
- Fatores de avaliação de impacto alternativos fornecidos para análise de sensibilidade para cada categoria de impacto;
- Todos os fatores de avaliação de impacto podem ser obtidos como planilhas, as quais são regularmente atualizadas;
- Distinção entre categorias de impacto básicas, específicas do estudo, e outras categorias de impacto.

2.3.4 Outros métodos de avaliação de impacto para realizar ACV

Apesar de não abordados neste estudo, é importante ressaltar que existem outros métodos de avaliação de impacto na literatura: análise *input-output* (I-O), análise de processos e análise híbrida. Esses vêm sendo utilizados como uma maneira de adaptar a avaliação de impacto do ciclo de vida, sendo que muitos deles são bastante adotados por estudos brasileiros.

Chau *et al.* (2015) acrescentam que as abordagens *midpoint*, *endpoint* e combinado, por vezes, distorcem o sistema em um determinado estágio da cadeia de abastecimento e, assim, não contam para entradas em fases mais elevadas ou em cadeia de suprimentos relacionados. Uma análise que ganhou força diante dessa lacuna foi a análise *input-output* para estimar os impactos de energia de ciclo de vida, mas que possui desvantagens que proporcionam "erros". Tanto essa análise como a crítica dos autores estão melhores descritas adiante.

Como alternativa de compensar essas desvantagens, pode ser utilizada uma análise híbrida, que combina os processos de ACV e *input-output*. Esse método consiste em utilizar dados de processo sempre que disponíveis para preencher as lacunas do sistema com os dados de entrada-saída, a fim de avaliar inteiramente a cadeia de um produto. Atmaca; Atmaca (2015) defendem a utilização da análise híbrida, já que é um método que pode ser considerado confiável e de relativa facilidade de obtenção dos dados.

A energia incorporada inicial do edifício é obtida por meio da multiplicação dos coeficientes de energia híbridos¹¹ relevantes pelas quantidades finais dos respectivos materiais contidos no edifício, incluindo o desperdício (CHAU *et al.*, 2015). Essa relevância significa que os materiais de entrada que representam menos de 1% em massa do total do produto costumam ser desprezados, obviamente no caso dos seus dados de energia incorporada não forem representativos.

Caldas (2016) utilizou o método de análise híbrida para comparar uma habitação com vedação vertical convencional com a vedação em *Light Steel Frame*, sendo que uma análise estatística foi realizada na busca do melhor valor do coeficiente de energia e emissões híbridos. O valor de corte adotado pelo autor foi 5% em massa, ou seja, foram desconsiderados os materiais com menos de 5% da massa total de materiais e componentes ou que representassem menos que 5% da energia incorporada total, diferentemente de Chau *et al.* (2015).

Silva; Silva (2015) e Gan *et al.* (2017) dividem a análise de impacto para cálculo de carbono e energia incorporados em apenas dois métodos: análise de entrada e saída (*input-output* ou I-O) e análise de processos. Considerando as limitações práticas de aplicação desses métodos, é que surgiram as análises híbridas.

As tabelas I-O¹² são uma ferramenta econômica deste método que permitem examinar os fluxos monetários entre setores produtores de energia e cruzá-los com a quantidade de energia produzida por setor (SILVA; SILVA, 2015). Apesar disso, Chau *et al.* (2015) afirmam que essa técnica sofre com o chamado "erro de agregação" por assumir que todos os produtos dentro de um setor têm mesma intensidade de energia por unidade monetária, gerando então grandes incertezas. Outra desvantagem desse método é que ele, segundo Gan *et al.* (2017), requer dados específicos da indústria para compor as tabelas, que não são publicamente

¹¹ São os coeficientes já calculados de energia para a etapa de berço ao portão (cradle-to-gate) de cada material. Um exemplo é que, segundo Silva; Silva (2015), a energia incorporada de um tubo de PVC é 65,24 MJ/kg.

¹² Elas relacionam o custo com as categorias de impacto por unidade funcional (BLACKHURST *et al.*, 2010).

disponíveis em muitas regiões. Além disso, não pode fornecer detalhes e análise específica do processo sobre as emissões de carbono da produção do material.

O método de análise de processos envolve o exame sistemático de entradas diretas e indiretas de energia em um processo (SILVA; SILVA, 2015). Gan *et al.* (2017) afirmam que esse método pode ser usado para superar as limitações da tabela I-O, já que utiliza um diagrama de fluxo individual que representa todos os processos associados à produção de um material e fornece as emissões de carbono de cada processo.

2.3.5 Identificação das categorias de impacto segundo o CML

Especificamente no método CML, são abordadas as seguintes categorias de impacto e descritas resumidamente conforme definição de Chenani *et al.* (2015):

- Depleção abiótica: refere-se ao uso (extração) de recursos naturais abióticos. Os impactos considerados nesta categoria são os derivados da extração de minerais e combustíveis fósseis. A unidade é kg de equivalentes de antimônio (Sb) ou MJ por unidade funcional;
- Potencial de acidificação: significa a acidificação de emissões de poluentes, tais como SO_2 ou NO_x , para o ar. Estas emissões têm impactos negativos no solo, águas subterrâneas, águas superficiais, organismos biológicos, ecossistemas e materiais. A unidade para cada produto químico acidificante é igualada a kg de SO_2 ;
- Eutrofização: refere-se à liberação de níveis elevados de macronutrientes, tais como nitrogênio e fósforo, para o ambiente. A unidade deste fator é kg de PO_4^{2-} equivalentes por kg de emissão;
- Potencial de aquecimento global: significa o impacto do produto no aquecimento global através da emissão de gases de efeito estufa para o ar em 100 anos. Cada gás de efeito estufa é igualado a kg de $\text{CO}_2\text{-eq}$, por kg de emissão;
- Depleção da camada de ozônio: os clorofluorocarbonetos são conhecidos por causar a perda da camada de ozônio que protege a terra de radiação UV prejudicial. Cada produto químico é igualado a kg de CFC-11, por kg de emissão;

- Ecotoxicidade de água doce: é o potencial somado de toxicidade aquática de água doce das substâncias emitidas ao ar, à água e ao solo durante o ciclo de vida do produto. A quantidade é igualada a um kg de 1,4-diclorobenzeno;
- Ecotoxicidade marinha: é o potencial somado da toxicidade aquática marinha. Ou seja, resulta do aumento da concentração de agentes tóxicos nos mares provocado pela disposição de rejeitos. A unidade deste fator é kg de 1,4-DB equivalentes por kg de emissão;
- Ecotoxicidade terrestre: é o potencial da toxicidade terrestre ou a categoria de impacto ambiental resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela disposição de rejeitos, ocasionando, conseqüentemente, potenciais danos à litosfera. A unidade desse fator é kg de 1,4 DB equivalentes por kg de emissão;
- Oxidação fotoquímica: é o potencial da formação fotoquímica de ozônio de cada substância emitida para o ar. A unidade desse fator é kg de equivalentes de etileno (C_2H_4);
- Toxicidade humana: resulta do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela disposição de rejeitos, ocasionando, conseqüentemente, potenciais danos à saúde humana. A unidade do fator de caracterização é kg de equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (1,4-DB).

No presente estudo, um recorte foi feito e foram analisadas as categorias de impacto referentes à depleção abiótica e ao potencial de aquecimento global ($CO_2\text{-eq}$), classificados dentro do uso de recursos e saúde humana, respectivamente.

Segundo EN 15804 (2013), o potencial de depleção abiótica (PDA) é calculado e declarado em dois indicadores diferentes:

- Elementos (uso de recursos): inclui todos os recursos materiais não renováveis e abióticos (com exceção dos recursos fósseis);
- Combustíveis fósseis: inclui todos os recursos fósseis.

A Universidade de Leiden, criadora do método CML, lançou um artigo sobre orientações das categorias de impacto relacionadas ao uso de recursos naturais. A definição da categoria de depleção abiótica (para seus criadores, Guinée e Heijungs, 1995) é: o consumo de recursos

que não são renovados na natureza e, eventualmente, serão esgotados completamente. A depleção de recursos abióticos é responsável por um grande número de problemas ambientais, segundo Heijungs *et al.* (1997) e conforme listados a seguir. Por este motivo é uma das categorias mais discutidas em uma ACV (GUINÉE *et al.*, 2002).

- O esgotamento das reservas naturais;
- A perda de opções de uso para as gerações futuras;
- O aumento dos impactos ambientais da mineração no futuro, porque os minerais de fácil acesso serão esgotados primeiramente.

Para Yellishetty *et al.* (2011), o esgotamento dos recursos abióticos implica que os recursos são consumidos através de uma desintegração física, intencional ou não. A depleção leva à redução da disponibilidade do tipo de recurso correspondente para as gerações futuras. Os impactos do uso de recursos têm sido uma categoria de impacto proeminente na maioria dos métodos de avaliação de impacto ambiental para a ACV desenvolvida desde o início dos anos 90.

Para Caneghem *et al.* (2010), potencial de depleção abiótica é um fator de caracterização baseado em reservas globais e taxas de extração. Segundo Guinée; Heijungs (1995), em termos de esgotamento, a reserva ultimamente extraível¹³ é o único parâmetro relevante de reserva. No entanto, dados confiáveis sobre a reserva ultimamente extraível não estão disponíveis e não são exatamente conhecidos, já que dependem de futuros desenvolvimentos tecnológicos. A depleção está diretamente relacionada com as taxas de extração e a avaliação das reservas naturais (estoques). Ou seja, o esgotamento de recursos é dependente da quantidade de recurso disponível e da velocidade de extração e, portanto, é dependente do tempo. Não há modelos envolvidos na derivação dos fatores de caracterização, mas as reservas finais usadas são apenas estimativas, uma vez que a concentração média de muitos elementos na crosta terrestre não é exatamente conhecida.

A explicação da escolha da substância antimônio (Sb) é devido à vantagem de que os potenciais de depleção abiótica estão mais próximos da unidade e, portanto, mais fáceis de ser compreendidos (CANEGHEM *et al.*, 2010). Guinée *et al.* (2002) assumem que todos os

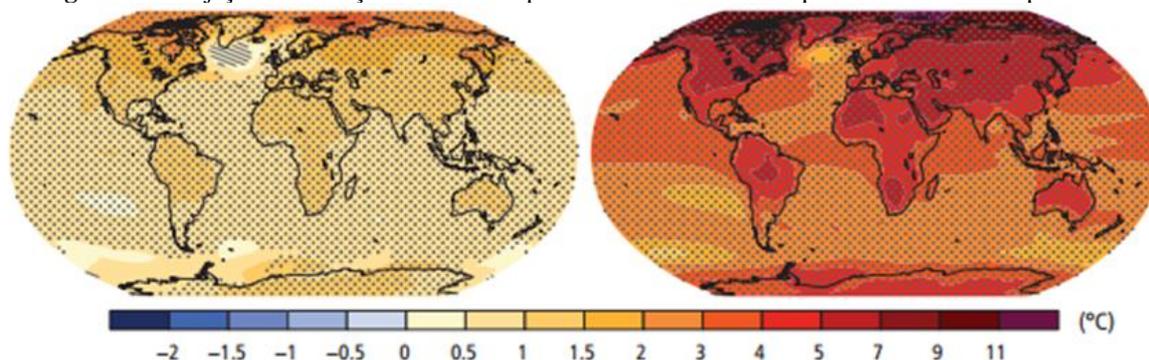
¹³ Reserva ultimamente extraível: nomenclatura adaptada e livremente traduzida de: "*Ultimately extractable reserves*". Significa a última reserva possível de certo recurso natural. É a mais dificilmente acessível e requer alto custo para exploração.

combustíveis fósseis são substitutos completos um para o outro e propõem um PDA global de energia fóssil, baseado em dados do Instituto Mundial de Recursos, igual a $4,81 \times 10^4$ kg de Sb_{-eq} por MJ de energia fóssil.

Os PDAs para um combustível fóssil específico podem ser calculados multiplicando esta energia total fóssil PDA com o valor de aquecimento (MJ/kg) do combustível fóssil considerado. Logo, de acordo com Silva; Silva (2015), os resultados podem ser em equivalência de antimônio (Sb), que na natureza está presente em minerais pesados; e em consumo de combustíveis fósseis, em MJ, independente se a matriz energética é renovável ou não.

O aquecimento global é o aumento da temperatura superficial média do planeta Terra. Sua principal causa¹⁴ é a concentração de gases que intensificam o efeito estufa. As emissões de GEE ocorrem praticamente em todas as atividades humanas e setores da economia (Ministério do Meio Ambiente, 2012), e traz como consequências as mudanças climáticas que causam impactos em sistemas naturais e humanos em todos os continentes e em todos os oceanos (IPCC, 2014). Na Figura 16, é apontada a variação média da superfície com base nas projeções médias de vários modelos para 2081-2100 (lado direito) em relação a 1986-2005 (lado esquerdo).

Figura 16: Projeção da variação média da superfície da Terra de 1986 para 2005 e de 2081 para 2100.



Fonte: IPCC, 2014.

As temperaturas da superfície permanecerão aproximadamente constantes a níveis elevados durante muitos séculos após a cessação completa das emissões antropogênicas líquidas de CO₂.

¹⁴ Mais da metade do aumento observado na temperatura média global da superfície de 1951 a 2010 foi causado pelo aumento antropogênico das concentrações de GEE (IPCC, 2014).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2012), os gases de efeito estufa, para o protocolo de Kyoto, são:

- O dióxido de carbono (CO_2), o mais abundante dos GEE, sendo emitido como resultado de inúmeras atividades humanas como, por exemplo, o uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e também com a mudança no uso da terra. A quantidade de dióxido de carbono na atmosfera aumentou 35% desde a era industrial, e este aumento deve-se a atividades humanas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e remoção de florestas;
- O gás metano (CH_4), produzido pela decomposição da matéria orgânica, sendo encontrado geralmente em aterros sanitários, lixões e reservatórios de hidrelétricas (em maior ou menor grau, dependendo do uso da terra anterior à construção do reservatório) e também pela criação de gado e cultivo de arroz;
- As emissões do óxido nitroso (N_2O), resultante, entre outros, do tratamento de dejetos animais, do uso de fertilizantes, da queima de combustíveis fósseis e de alguns processos industriais;
- O hexafluoreto de enxofre (SF_6), utilizado principalmente como isolante térmico e condutor de calor. É o gás com o maior poder de aquecimento;
- O hidrofluorcarbonos (HFCs), utilizados como substitutos dos clorofluorcarbonos (CFCs) em aerossóis e refrigeradores, que apesar de não mais agredir a camada de ozônio, têm alto potencial de aquecimento global;
- Os perfluorcarbonos (PFCs), utilizados como gases refrigerantes, solventes, propulsores, espuma e aerossóis.

Para se chegar a uma única unidade de Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential - GWP*), foi escolhido o CO_2 . Ou seja, todos os gases de efeito estufa são convertidos no equivalente de dióxido de carbono ($\text{CO}_{2\text{-eq}}$). Os dados de conversão são apresentados na Figura 17.

Figura 17: Conversão dos GEE em CO₂-eq.

Gás	Símbolo	GWP
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Óxido nitroso	N ₂ O	310
Hidrofluorcarbonos	HFC-23	11.700
	HFC-125	2.800
	HFC-134a	1.300
	HFC-143a	3.800
	HFC-152a	140
Perfluorcarbonos	CF ₄	6.500
	C ₂ F ₆	9.200
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	23.900

Fonte: Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasil, 2014.

Segundo o IPCC (2014), as influências antropogênicas provavelmente afetaram o ciclo global da água e contribuíram para o recuo dos glaciares desde 1960 e para o aumento do derretimento superficial da camada de gelo da Groenlândia desde 1993. Contribuíram também para a perda do gelo ártico desde 1979 e para o aumento do teor global de calor do oceano e para o aumento médio do nível médio do mar observado desde a década de 1970.

Dessa forma, a análise da depleção abiótica e do potencial de aquecimento global é essencial para a avaliação do desempenho ambiental dos sistemas construtivos utilizados na construção civil, em especial àqueles que são considerados "sustentáveis" sem estudos detalhados sobre o assunto.

2.3.6 Fases do ciclo de vida de um produto

Para uma edificação, as fases de uma ACV são divididas, conforme a EN 15804: 2013, em torno dos estágios de utilização do produto e apresentadas na Figura 12. São basicamente definidas em torno da utilização do objeto a ser avaliado: pré-uso, uso e pós-uso. Dentro de cada fase existem as etapas que as compõem.

A ACV completa é definida como sendo do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*), ou seja, desde a origem da extração das matérias-primas de um produto ao seu destino final. Porém, segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2014, partes específicas do ciclo de vida podem ser analisadas isoladamente, como por exemplo, o manejo de resíduos. Algumas mais comuns são:

- A avaliação desde a origem das matérias-primas até a saída da fábrica: berço ao portão (*cradle-to-gate*);
- A avaliação do berço ao portão com opções inclui elementos da construção/instalação da edificação (EN 15804: 2013);
- A avaliação apenas dentro dos limites físicos da fábrica: portão ao portão (*gate-to-gate*);
- A avaliação incluindo a retroalimentação dos resíduos no fluxo produtivo: berço ao berço (*cradle-to-cradle*).

A importância de uma ACV inclui, segundo Silva; Silva (2015), a padronização de um protocolo para análise ambiental de produtos, assim como a existência de métricas que apontem o resultado em relação a referências fixadas contextualmente. A subjetividade ainda é um impasse para pesquisadores de ACV, especialmente no Brasil, pela falta de padronização dos fluxos de produção.

Como a complexidade da elaboração de uma ACV, especialmente de um sistema construtivo, permite simplificações de análise, neste estudo, nem todas as subfases apresentadas na Figura 18 foram consideradas. Maiores detalhes podem ser observados no item 3.1 (objetivo e escopo da ACV).

Figura 18: Fases de uma ACV.

Fonte: Adaptado da EN 15804: 2013.

2.4 ACV EM TELHADOS VERDES

A literatura internacional apresenta algumas pesquisas com diversos autores que consideraram a metodologia de ACV em telhados verdes. Considerando os trabalhos internacionais expostos a seguir (em ordem cronológica), tem-se quatorze pesquisas, encontradas na busca pelas palavras-chave ACV (*Life Cycle Assessment*) e telhado verde (*green roof*) na plataforma de busca dos Periódicos da Capes. A restrição temporal foi do ano 2006 ao ano de 2016. Todas as fases da ACV que foram analisadas estão reunidas na Figura 13.

Saiz *et al.* (2006) desenvolveram uma pesquisa de ACV de sistemas de cobertura para comparar com o sistema convencional de um edifício residencial em Madri. A ACV foi realizada para todo o edifício com a mudança de cada opção de telhado, assumindo uma vida útil de 50 anos. Foram consideradas três fases do ciclo de vida: produção e transporte de materiais; Operação e Manutenção do edifício. A abordagem foi feita usando o *software SimaPro*. O telhado verde estudado foi do tipo extensivo e os resultados mostraram que os impactos ambientais foram reduzidos de forma mais significativa em categorias associadas principalmente à geração de eletricidade, mas os autores enfatizam a necessidade de habitações vizinhas, ou mesmo toda a cidade, possuírem cobertura em telhado verde.

Kosareo e Ries (2007) aplicaram uma ACV para comparar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados com a construção, manutenção e disposição de 1115 m² de cobertura nos EUA. As fases consideradas na ACV foram: execução (ou instalação), operação, manutenção e demolição. Na pesquisa, para coleta dos dados, foi utilizado o *software SimaPro* e o método de avaliação *Impact 2002+*. O trabalho compara um telhado verde extensivo, intensivo e uma cobertura convencional com lastro de pedra. O telhado verde intensivo foi o que apresentou o menor consumo elétrico e de gás dentro do cenário analisado.

Blackhurst *et al.* (2010) analisaram um telhado verde extensivo, em escala do meio urbano, com vida útil de 30 anos sem especificar nenhuma informação sobre as camadas constituintes nos EUA. A metodologia de avaliação foi a análise econômica *input-output* para três categorias de impacto: uso de energia, emissões de GEE e escoamento de águas pluviais. As fases de ACV avaliadas foram: produção, construção e uso. Os resultados sugeriram que telhados verdes são estratégias rentáveis para gerenciamento de águas pluviais e redução de gases de efeito estufa.

Peri *et al.* (2012) avaliaram o ciclo de vida de um substrato de telhado verde em edificações na Itália, considerando as fases de produção, manutenção e fim de vida. A unidade funcional do sistema foi de 1 m² de cobertura de um telhado verde extensivo. A vida útil da edificação foi 50 anos. O *software* utilizado foi o *SimaPro* com a base de dados *Ecoinvent*. No geral, os autores defendem o uso de telhado verde extensivo como o estudado como ferramenta com bom desempenho ambiental.

Bianchini e Hewage (2012) analisaram apenas a fase de produção, a partir do *software SimaPro* com a metodologia de *Eco-indicator*. Os autores compararam cada camada de um telhado verde intensivo e um extensivo. Apesar da quantidade expressiva de polímero empregado na composição de suas camadas, os resultados demonstram que existem mais vantagens do que desvantagens da construção de telhados verdes para reduzir a poluição do ar.

Hong, Kim e Koo (2012) e Kim, Hong e Koo (2012) avaliaram o substrato e a vegetação de um telhado verde extensivo com vida útil de 40 anos. As pesquisas realizaram ACVCO₂ (emissões de CO₂) e CVC (custo do ciclo de vida). Apenas a fase de uso (operacional) foi considerada e os autores fizeram uso do *Energy Plus*¹⁵. A principal diferença entre os dois é no estudo de caso e nos cenários avaliados. Observou-se melhoria do desempenho energético com o uso do telhado verde.

Rivela *et al.* (2013) fizeram uma ACV de um telhado verde extensivo em uma edificação comercial, apenas para a fase de produção. O método de avaliação escolhido foi o *CML 2000*. Os pontos críticos do sistema foram identificados para estabelecer uma estratégia de projeto para reduzir os impactos ambientais. Os autores enfatizaram a importância do impacto do suporte estrutural.

Lamnatou e Chemisana (2014) fizeram uma ACV de telhado verde intensivo e extensivo incluindo o uso de placa fotovoltaica (cobertura com 30 anos de vida útil). Os métodos de avaliação foram: *Ecoinvet 99*, *Impact 2002+* e *CED*. A pesquisa comprova a eficácia de incrementar as placas em um telhado verde. Os autores deram continuidade ao trabalho e, em uma nova etapa, mudaram os métodos de avaliação: *ReCiPe* e também o *software SimaPro* com a base de dados *Ecoinvent*.

¹⁵ Ver item 3.1.5.

Rincón *et al.* (2014) analisaram a camada de drenagem com borracha reciclada de um telhado verde extensivo com vida útil de 50 anos. A avaliação foi do berço ao portão utilizando o *software SimaPro* com o método de *LCAmanage*. Os autores concluíram que o sistema construtivo telhado verde com borracha reciclada foi considerado mais sustentável ambientalmente e que deve ser recomendado para a utilização em edifícios.

Chenani *et al.* (2015) utilizaram duas composições de modelo de substratos diferentes, de acordo com a disponibilidade no local do estudo (Finlândia). A vida útil foi de 40 anos. Foram analisadas as fases de produção e transporte de matérias primas, uso e destinação final com o auxílio do *software SimaPro* com a base de dados *Ecoinvent*. Os autores estimaram que as maiores cargas ambientais estavam relacionadas com a lã de rocha, camadas de drenagem de plástico e argila expandida.

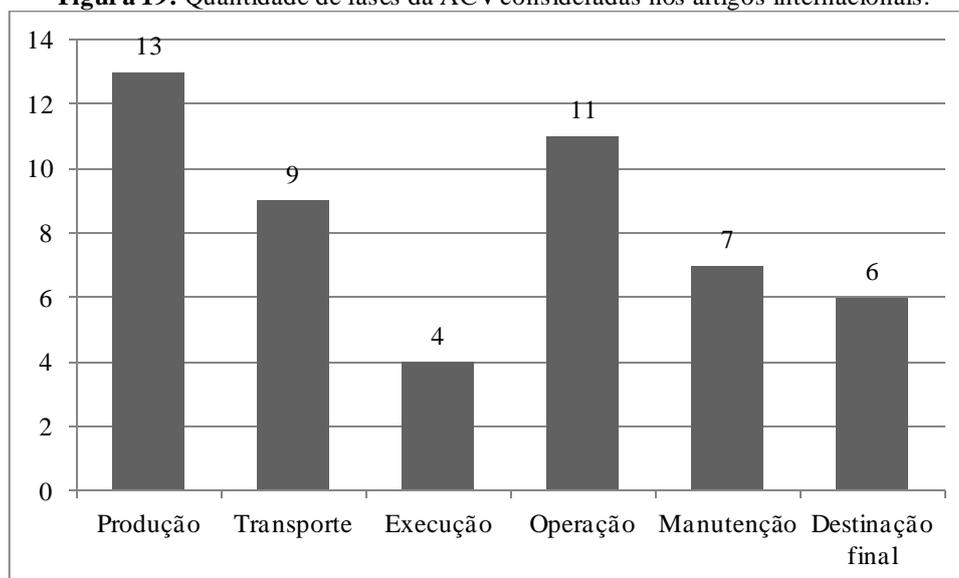
Contarini e Meijer (2015) compararam vários tipos de cobertura com uma vida útil de 30 anos. As fases analisadas foram: produção, uso e manutenção. Foi usada a base de dados *Ecoinvent*. A avaliação do impacto foi através do método *ReCiPe (endpoint)* e o consumo de energia pelo método *Dutch*. Os autores concluíram que os sistemas de cobertura com um revestimento reflexivo e telhados verdes têm os mais altos valores nas categorias de impacto, mas eles também têm um efeito positivo sobre a carga de refrigeração do edifício, melhoram a vida útil da membrana impermeável e reduzem o efeito de ilha de calor. O telhado verde tem um dos mais elevados danos para a categoria de consumo de recursos por causa da grande quantidade de materiais necessários.

Cubi *et al.* (2015) utilizaram placas fotovoltaicas e compararam com um telhado verde. Fizeram a ACV para as fases de produção, transporte e operação. Utilizaram os *softwares SimaPro* (com base de dados *Ecoinvent* e método de avaliação *Impact 2002+*) e *Energy Plus*. A vida útil considerada foi de 50 anos e a conclusão foi que a cobertura com as placas possuiu maior desempenho em todas as categorias avaliadas, mas que o telhado verde resultou nos menores valores de impactos positivos em todas as categorias analisadas, inclusive depleção (apenas combustíveis fósseis) e aquecimento global, dentre outros.

El Bachawati *et al.* (2016) compararam um telhado verde extensivo já existente com três coberturas fictícias: telhado verde intensivo, tradicional com cascalho e telhado reflexivo branco para a região do Líbano. A vida útil foi de 45 anos e a ACV de berço ao portão foi analisada pelo *software SimaPro* com a base de dados *Ecoinvent*. O estudo concluiu que o telhado verde extensivo foi a melhor opção em todas as categorias de impacto ambiental.

Dentre as informações de origem da pesquisa, a maioria foi realizada na Espanha (4 pesquisas), seguida pelo Canadá (3). Além disso, tiveram pesquisas na Coreia (2), EUA (2), Itália (1), Holanda (1), Finlândia (1) e Líbano (1). Em relação às fases da ACV analisadas em cada pesquisa, tem-se na Figura 19 que a maioria se restringiu à etapa de produção e operação.

Figura 19: Quantidade de fases da ACV consideradas nos artigos internacionais.



Fonte: Autora.

O detalhe geral, de cada pesquisa, é apresentado na Tabela 2. O resumo auxilia na visualização das lacunas da pesquisa de ACV em Telhados Verdes. São concentradas as informações sobre o ano, o tipo de cobertura, o software e, finalmente, a contribuição de cada uma das pesquisas em relação ao impacto ambiental do telhado verde (TV).

Não há, entre os pesquisadores, um consenso (ou uma padronização) nas fases consideradas no ciclo de vida. A escolha das fases analisadas ocorre de forma arbitrária, e a subdivisão dessas fases contraria, por vezes, as normas referentes.

Também não há uma padronização no tipo de composição do telhado verde utilizado, já que cada autor utiliza diferentes materiais para compor as camadas do telhado. Esse panorama acaba por dificultar o agrupamento de pesquisas do sistema de telhado verde de países diferentes.

Tabela 2: Resumo dos trabalhos internacionais de ACV em Telhado Verde (TV).

Autor	Ano	Cobertura	Software ou método	Conclusão
Saiz et al.	2006	TV x convencional	SimaPro	Impacto ambiental do TV reduzidos entre 1 e 5,3%
Kosareo e Ries	2007	TV extensivo, intensivo e convencional	SimaPro	Melhor opção ambiental por reduzir a demanda de energia
Blackhurst et al.	2010	TV extensivo	Input-Output	Os TVs não são tão caros em relação aos telhados convencionais. Podem ser reduzidos pelo maior uso de produtos locais
Peri et al.	2012	Substrato de TV	SimaPro	Os autores enfatizam a importância de melhor especificação da camada de substrato, incluindo a melhor maneira de eliminá-lo, devido à importância da etapa de fim de vida.
Bianchini; Hewage	2012	Camadas de TV extensivo e intensivo	SimaPro	TV é um sistema vantajoso a longo prazo, mas uso de plásticos em sua composição deve ser substituído por materiais ecológicos
Hong, Kim e Koo / Kim, Hong e Koo	2012	Substrato e vegetação	EnergyPlus	A implantação de TVs foi menos rentável que as instalações já existentes, mas ficou demonstrado o efeito de economia de energia com os TVs
Rivela et al.	2013	TV extensivo	CML 2000	Os autores enfatizam o impacto ambiental provocado pelo suporte estrutural
Lamnatou e Chemisana	2014	TV extensivo, TV intensivo com placa fotovoltaica	Ecoinvent 99, Impact 2002+ e CED	A vantagem é a melhora da eficiência da placa que é atribuída ao efeito de resfriamento causado pela camada de vegetação
Ricon et al.	2014	TV extensivo	SimaPro	O TV com borracha reciclada na camada de drenagem é um sistema ambientalmente amigável e deve ser recomendado para o uso em edifícios
Lamnatou e Chemisana	2015	TV extensivo, TV intensivo com placa fotovoltaica	SimaPro, método ReCiPe	A maior parte do impacto é atribuída aos laminados e aço
Chenani et al.	2015	TV com diferentes camadas	SimaPro	Maiores encargos ambientais provenientes do uso de lã de rocha, plásticos e argila expandida.
Contarini; Meijer	2015	TV x coberturas com isolamento	ReCiPe e Dutch	Os autores defendem a utilização de um bom isolamento térmico no telhado para reduzir as perdas de calor (local do estudo: Holanda). A manutenção teve a menor contribuição para os resultados
Cubi, et al.	2015	TV x placa fotovoltaica	SimaPro e EnergyPlus	Os telhados verdes resultaram em impactos positivos líquidos para a maioria das categorias de impacto,

				incluindo as emissões de GEE
El Bachawati et al.	2016	TV extensivo x TV intensivo, telhado convencional e telhado reflexivo branco	SimaPro	O TV extensivo teve os menores impactos ambientais para todas as categorias analisadas. A maior contribuição, dentre os componentes, foi do concreto, aço, membrana de impermeabilização e isolamento térmico

Fonte: Autora.

Em relação aos trabalhos nacionais, pode ser apontado o de Tavares *et al.* (2014) que fez, por meio de uma análise híbrida de dados secundários, o cálculo de energia e CO₂ incorporados de sistemas de cobertura. Apenas a fase de pré-uso foi considerada e os autores concluíram que, no sistema de telhado verde, a impermeabilização e o substrato são os maiores responsáveis pela alta energia incorporada.

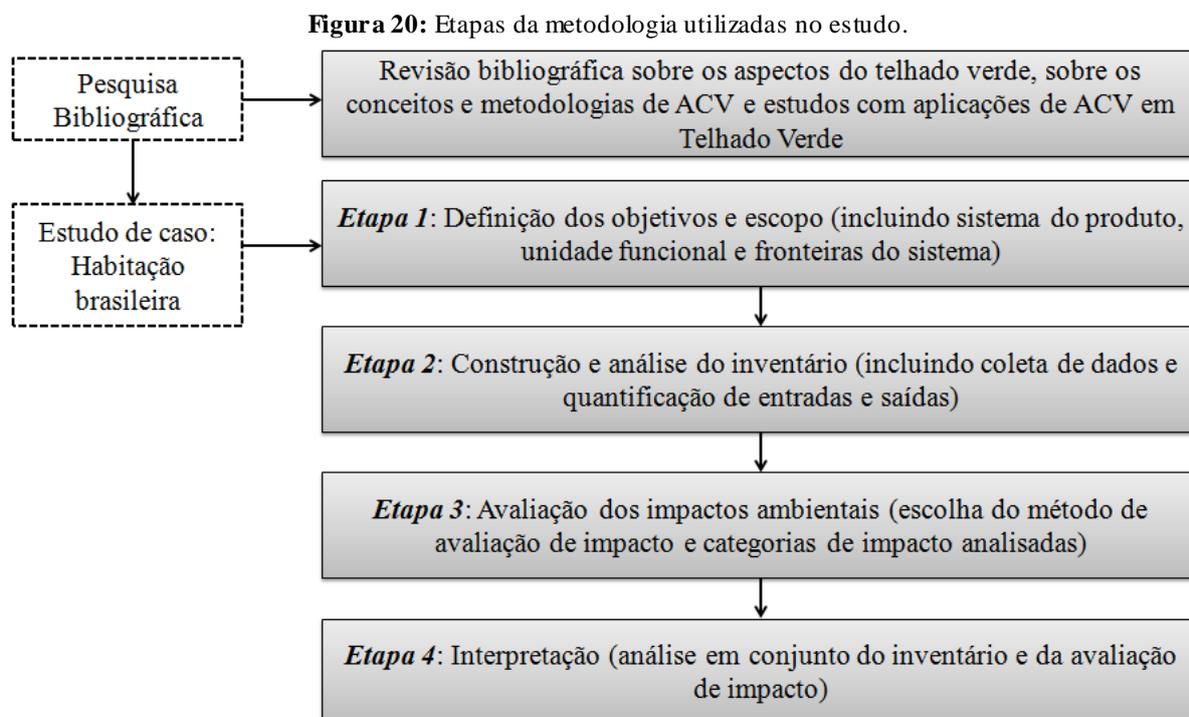
A frequente reposição do substrato foi o maior responsável pelas emissões de CO₂ analisado por Lira; Sposto (2016), estudo realizado também por análise híbrida. Já o uso de materiais poliméricos nas camadas do telhado verde foram os maiores consumidores de energia incorporada do sistema.

Lira *et al.* (2016) concluíram, por meio da análise do levantamento bibliométrico do estado da arte de ACV em telhados verdes, que não há uma padronização dos materiais constituintes das camadas do telhado, nem da disposição das mesmas, e cada autor utilizou das suas próprias fronteiras de ACV, dificultando uma comparação entre diferentes pesquisas com o mesmo sistema.

Com o objeto de estudo definido, a escolha do *software* se faz necessária para a posterior decisão sobre qual método de avaliação será utilizado para, então, quantificar todos os valores de depleção abiótica e emissões de CO_{2-eq}. Todas essas importantes distinções são necessárias para convergir para os resultados esperados, que são o uso de recursos naturais e o potencial de aquecimento global.

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, procedeu-se ao cumprimento de algumas etapas necessárias ao estudo (Figura 20). Tais etapas foram elaboradas de acordo com os conceitos e metodologias da ferramenta de ACV.



Fonte: Autora.

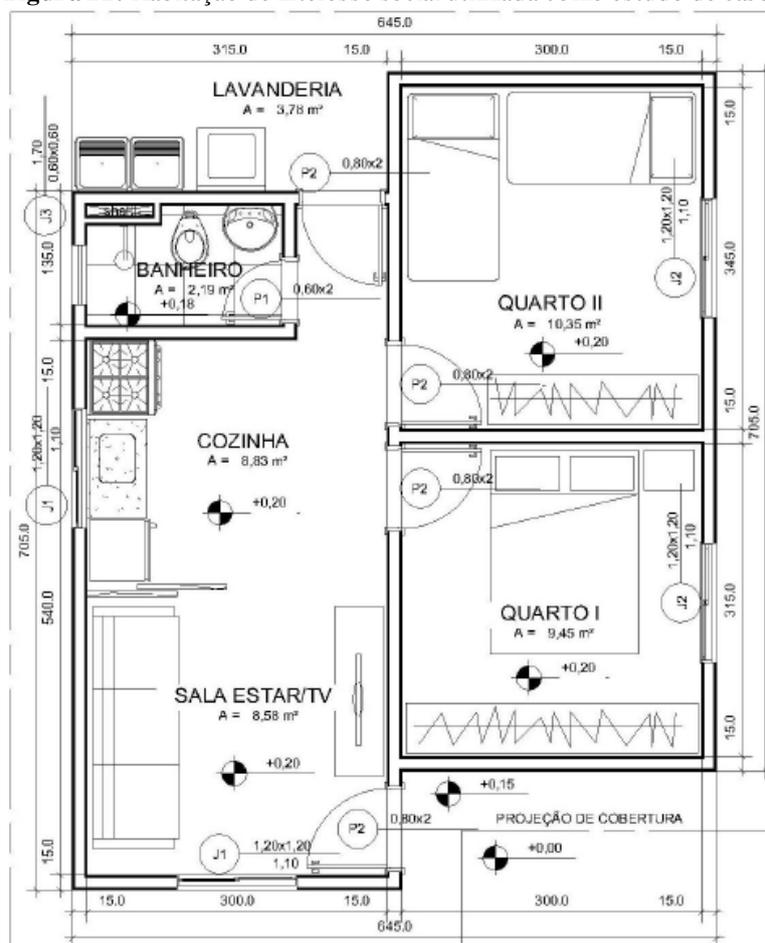
3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO

O objetivo da avaliação do ciclo de vida foi buscar afirmações comparativas entre dois sistemas construtivos de cobertura: telhado verde e convencional.

Para aplicação da ACV em telhado verde para devida comparação com uma cobertura convencional foi considerado um estudo de caso. A escolha foi uma habitação com cinco cômodos dispostos em uma área de 45 m²: dois quartos, sala, cozinha e banheiro (Figura 21). A área de serviço é coberta totalizando, aproximadamente, 50 m² de cobertura. A escolha da habitação foi devido ao fato desse modelo ter sido utilizado em trabalhos anteriores de ACVE e ACVCO₂ de vedações verticais: Pedroso (2015), Caldas (2016) e Caldeira (2016).

Considerou-se que a habitação está situada em Brasília (DF), e tem vida útil igual a 50 anos, conforme recomendado pela ABNT NBR 15575:2013 (Norma brasileira de Desempenho).

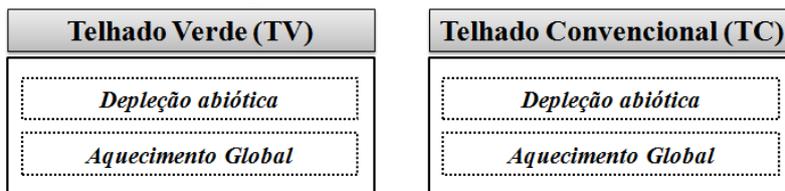
Figura 21: Habitação de interesse social utilizada como estudo de caso.



Fonte: Pedroso (2015).

As variáveis do estudo estão concentradas na comparação de um telhado verde com um telhado convencional, utilizado comumente em habitações brasileiras. Para os dois sistemas de cobertura, os impactos analisados serão: depleção abiótica e potencial de aquecimento global, conforme esquematizado na Figura 22.

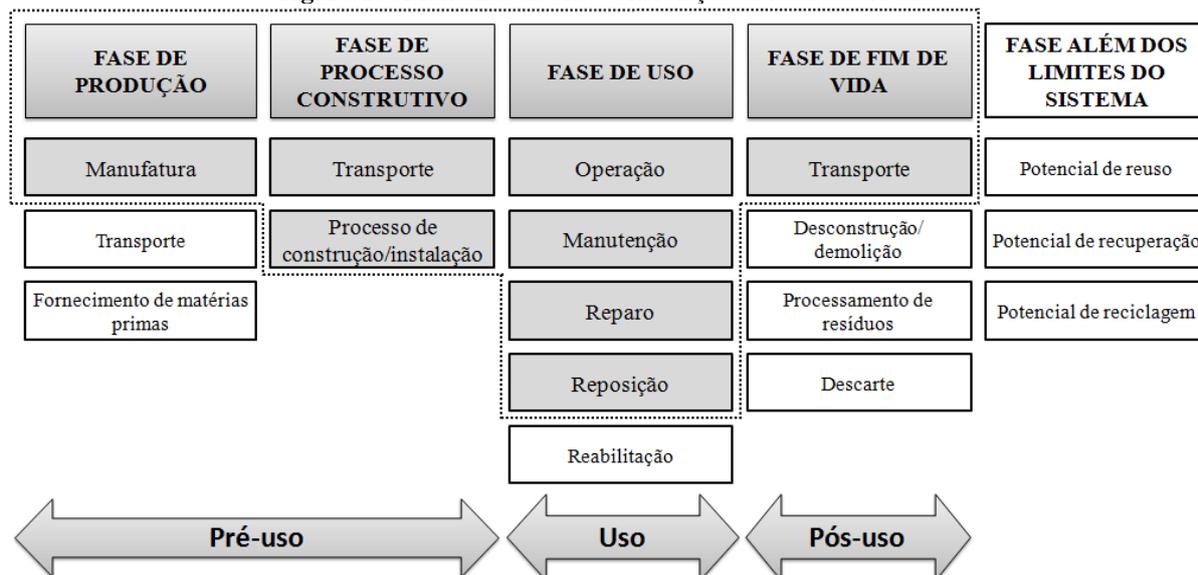
Vale ressaltar que ambos os objetos de comparação são sistemas de cobertura como um todo, mas que, para facilidade de nomenclatura, atribuiu-se o nome "telhado" nos dois sistemas. Todo o escopo da ACV e os métodos empregados serão especificados ao longo deste capítulo.

Figura 22: Variáveis do estudo.

Fonte: Autora.

3.1.1 Fases da ACV de berço ao túmulo

Nem todas as fases de uma ACV de uma edificação ou sistema construtivo, apresentadas na EN 15804: 2013 foram consideradas neste estudo. A fronteira da ACV, em relação às suas fases, está apresentada na Figura 23.

Figura 23: Fronteiras da ACV em relação às fases abordadas.

Fonte: Autora.

O transporte foi apenas considerado na fase de processo construtivo (distância da fábrica para o local da obra). Na fase de manutenção, a reabilitação foi desconsiderada. Na fase de fim de vida, apenas o transporte para aterro foi considerado. A fase além dos limites do sistema não foi abordada.

Para melhor execução e interpretação da ACV, todas as fases do ciclo de vida consideradas no estudo, foram estratificadas e denominadas (Tabela 3).

No *software GaBi*, as entradas do caminhão Truck são: diesel e carga; as saídas: emissões de cargas e combustão (amônia, benzeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, monóxido de nitrogênio, dióxido de nitrogênio, óxido nítrico, COV, partículas PM2,5, dióxido de enxofre).

As especificações do caminhão Truck, dentro do *software GaBi*, são:

- É um caminhão articulado;
- Peso bruto do caminhão de 34-40t;
- Capacidade de carga útil de 27t.

No caso do sistema convencional - TC, houve a inserção de eletricidade na etapa de execução, considerando apenas o uso de equipamento de adensamento do concreto. O Telhado Verde - TV foi considerado um sistema de montagem, não exigindo uso de energia elétrica para execução.

O concreto no TC foi considerado usinado, mas na busca de fluxos no *GaBi*, optou-se pelo desmembramento de seus elementos: cimento, areia e brita, de acordo com traço contido no SINAPI para Fck de 30 MPa.

O substrato foi considerado como uma composição de areia e brita, além de um composto de carbono e nitrogênio, como orientado por Catalano *et al.* (2016). O composto foi considerado de compostagem e por isso não existe fluxo correspondente.

A etapa de transporte (ET) foi incluída no fluxograma de cada sistema e o caminhão e o combustível foram escolhidos dentro da base do próprio *software*.

Os resíduos foram incluídos como saída em ambos os sistemas.

A remoção dos resíduos gerados pela etapa de execução e pela demolição/desconstrução foi realizada por caminhão Truck, abastecido com diesel, para disposição em aterro.

Para a etapa de manutenção (EM), foi utilizado um fator de reposição (FR) referente a quantidade de vezes que o material deverá sofrer substituição. Assim sendo, no telhado verde

o substrato possui FR de 9,8 de acordo com Lamnatou; Chemisana (2014) e na cobertura convencional apenas as telhas são substituídas com um FR de 2,5, segundo Bengoa (2011)¹⁶.

3.1.2 Etapa operacional (EO)

Neste estudo, a contribuição da etapa operacional para as categorias de impacto analisadas está relacionada exclusivamente com a utilização de energia elétrica para o funcionamento dos aparelhos de condicionamento artificial. Obviamente, existem outras formas de utilizar energia elétrica em edificações, como equipamentos eletrônicos, porém, considerou-se o atendimento a um dos objetivos deste estudo, que é relacionar o impacto ambiental dos sistemas de cobertura com o desempenho térmico dos mesmos. Além disso, é o único ponto de distinção entre eles, já que a quantificação de consumo de equipamentos para cocção, por exemplo, independe das características térmicas dos sistemas de vedação.

O sistema de resfriamento de ambientes determinado foi o tipo “*Split no fresh air*”, utilizando o perfil “Apartamento *Cooling*”, com eficiência de aparelho de valor mínimo de eficiência para aparelhos com Selo Procel C (eficiência média), de eficiência igual a $CoP = 2,8$ (MACIEL, 2013). Foi adotado o selo Procel nível C (mínimo) pelo fato da EHU estudada ser de baixo padrão, e normalmente os usuários deste tipo de edificação optam por aparelhos de menor custo e provavelmente de menor eficiência (CALDAS, 2016).

Como foi avaliado por Caldas (2016), optou-se por colocar apenas um aparelho de condicionamento na sala de estar, já que este cenário apresentou maior diferença entre os apresentados pelo autor.

A agenda de uso do aparelho de ar-condicionado foi considerada “cheia”, ou seja, a qualquer momento do dia o equipamento pode ser acionado em função apenas da temperatura de conforto. Isso significa que quando a temperatura ambiente atingir temperaturas iguais ou superiores a 24°C, o equipamento de condicionamento será ligado. Estas considerações se adequam a cidade de Brasília (zona bioclimática 4), conforme calculado por Caldas (2016).

¹⁶ Único dado encontrado na literatura e, por isso, recomenda-se a análise de sensibilidade para trabalhos futuros.

Para o cálculo do consumo energético na etapa operacional da habitação nos cenários avaliados, utilizou-se o software *Design Builder*¹⁷, do *Energy Plus*, que é o recomendado pela norma brasileira de desempenho ABNT NBR 15575 (2013). *Energy plus* é uma ferramenta que foi desenvolvida pelo Departamento de Energia dos EUA para quantificar o consumo energético de sistemas de resfriamento e aquecimento. Também é o software utilizado pelo Procel Edifica e por laboratórios credenciados no Brasil.

A simulação foi feita com base no projeto de uma habitação constituída por vedação vertical de blocos cerâmicos (convencional) e cobertura TV e TC. Foi feita a inserção do arquivo climático (extensão TRY do INMET 2015) retirado do Laboratório de energia e eficiência energética (LabEEE - UFSC).

A respeito das características térmicas, é importante ressaltar o conceito de Transmitância térmica (U) e Capacidade térmica (Ct), que são esclarecidos a seguir conforme ABNT NBR 15220: 2003. Transmitância térmica é o inverso da resistência térmica total, ou seja, quanto maior o valor de U, menor é o valor da resistência à passagem de calor. Sua unidade é $W/(m^2.K)$. Capacidade térmica (Ct) é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema dividido pela sua área. Sua unidade é $J/(m^2.K)$. Os valores desses dois parâmetros estão apresentados na Tabela 5, para cada sistema considerado. Os resultados foram extraídos do catálogo de propriedades térmicas do LabEEE (UFSC) para o TC, e calculado pela autora segundo as recomendações da ABNT NBR 15220-3: 2005.

Tabela 4: Valores de transmitância e capacidade térmica.

	TV	TC
Transmitância térmica (U) ($W/m^2.K$)	0,83	2,05
Capacidade Térmica (Ct) ($kJ/m^2.K$)	233,77	238

Fonte: Autora.

¹⁷ *Design Builder* é um software com a interface de usuário mais consagrada e mais avançada para o *Energy Plus*, que é a ferramenta de simulação energética padrão do setor da construção, além de ser recomendado pelas normas brasileiras (ABNT NBR 15220: 2003 e ABNT NBR 15575:2013).

Considerando as exigências normativas para a zona bioclimática 4 (Brasília), a ABNT NBR 15575-4: 2013 considera que, para absorptância¹⁸ acima de 0,6, a transmitância térmica deve ser inferior a 2,5 W/m².K. Os sistemas atendem ao desempenho térmico solicitado pela norma. A capacidade térmica deve ser maior que 130 kJ/m².K, também obedecida pelos sistemas.

O consumo energético na fase de uso (valor em kWh) foi calculado como sendo o total de energia por ano de toda a habitação de consumo para condicionar artificialmente o ambiente, de acordo com a resistência térmica de cada cobertura e em toda a sua vida útil.

Para a real influência do consumo energético nas categorias de impacto, o valor gerado no *software Design Builder* foi incluído no *GaBi* durante a etapa operacional, para haver a correta tradução para os valores correspondentes de depleção abiótica e aquecimento global. A energia elétrica escolhida no *GaBi* corresponde a dados da matriz energética brasileira, adaptada na base do próprio *software*.

3.1.3 Unidade Funcional

A unidade funcional escolhida foi de 1 (um) m² de cobertura, comum a todos os sistemas analisados e com espessura variável, de acordo com o tipo de cobertura. Portanto, todos os resultados das categorias de impacto foram apresentados em valores para unidade funcional.

3.1.4 Fronteiras do sistema

Diante da magnitude de uma ACV do berço ao túmulo, é natural que sejam feitas algumas limitações das variáveis de pesquisa, chamadas de fronteiras do escopo da ACV. Tais fronteiras estão apresentadas na Tabela 5.

¹⁸ Absortância da vegetação: 0,7 e da telha cerâmica entre 0,75 e 0,80.

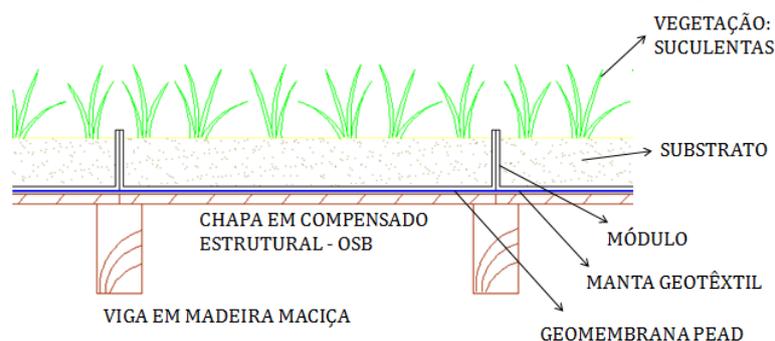
Tabela 5: Fronteiras consideradas na ACV.

Fronteiras temporais	De acordo com a base de dados profissional do <i>software GaBi</i> de 2012 e a última atualização do CML 2001 (2013).
Fronteiras geográficas	A pesquisa tem amplitude internacional pela extração dos fluxos produtivos do <i>software GaBi</i> e, quando necessárias, alterações foram feitas nos processos para que se assemelhassem ao brasileiro.
Fronteiras tecnológicas	A tecnologia mais recente, em casos de processo fabril. No sistema convencional, a tecnologia de montagem foi tradicional, exceto pelo concreto da laje que foi considerado usinado.

Fonte: Autora.

3.1.5 O sistema de telhado verde (TV)

O sistema escolhido para este trabalho é o telhado verde modular (conforme apresentado anteriormente no item 2.2), devido à sua facilidade na montagem e na manutenção, além da redução do peso total. É composto por módulos plásticos que abrigam o substrato e a vegetação juntamente com a água drenada por esse sistema. O corte esquemático está representado na Figura 25.

Figura 25: Sistema de telhado verde modular (TVM) utilizado na pesquisa.

Fonte: Autora.

O sistema foi dimensionado para suportar o peso saturado do módulo (80 kg/m²). O suporte estrutural possui inclinação de 2%. Segundo Savi (2012), a camada de drenagem cumpre duas funções no telhado verde: encaminhar a água e armazenar a água para as vegetações, disponibilizando sempre nutrientes para a camada vegetativa. Nas extremidades da inclinação

da cobertura, possui um sistema simples de tubo coletor, para, no caso de haver excesso de chuva, a água ser direcionada para o tubo de queda. Como é o mesmo sistema de coleta de água pluvial, sem diferenças significativas, este foi desconsiderado na comparação. Não há forro neste sistema, por considerar que a estrutura de madeira já faz a função de forro.

Sobre o detalhe construtivo do suporte estrutural no sistema de vedação vertical, uma junção no encontro viga de madeira e cinta de concreto armado foi pensada. O detalhe é semelhante ao apresentado na Figura 26. Todo material auxiliar para esta fixação foi desconsiderado no estudo.

Figura 26: Detalhe construtivo das vigas de madeira maciça no TV.



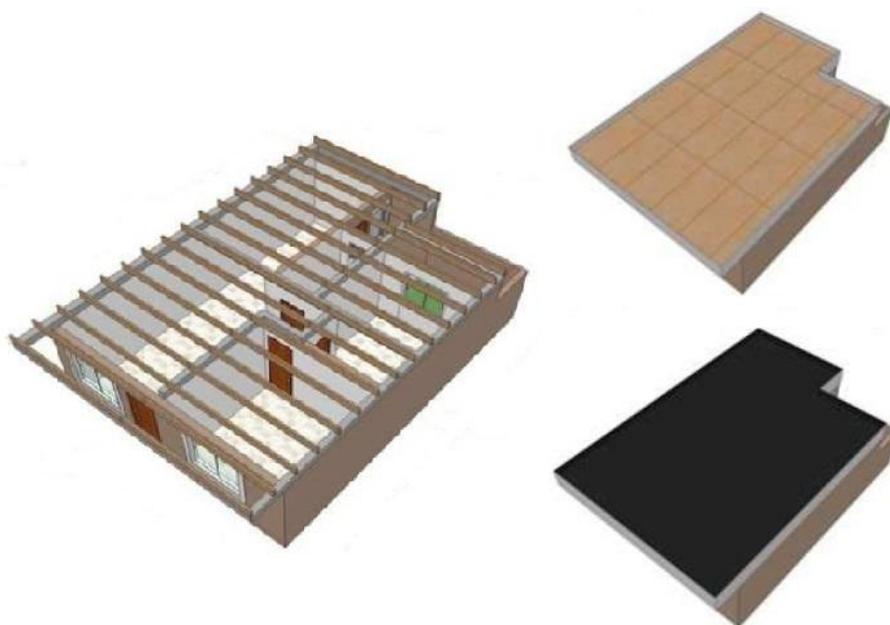
Fonte: <http://casinhadolopes.blogspot.com.br/2014/10/ola-vizinhos-esses-ultimos-dias-esta.html>.

Na literatura científica, observa-se que o alto consumo energético e as emissões de gases poluentes provocados pelo cimento e o aço já estão consolidados. Dessa forma, a escolha da madeira no suporte estrutural foi em busca de estratégias mais ambientalmente favoráveis, já que o telhado verde é um sistema construtivo que pode permitir variações e aplicação sobre diversas superfícies e estruturas (Tavares *et al.*, 2014).

A estrutura de madeira é composta por vigas em madeira maciça (Angelim Pedra com dimensões de 7x15 cm) com fechamento em compensado estrutural do tipo *Oriented Strand Board (OSB)* para servir de base para o telhado verde extensivo. A geomembrana (polietileno de alta densidade - PEAD) foi usada para impermeabilização e sobre ela, foram dispostos módulos alveolares leves. O suporte estrutural está apresentado na Figura 27.

Para o módulo alveolar leve, considerou-se uma membrana geotêxtil antes do substrato para facilitar a filtragem de água e armazenamento dela no seu interior. Para reduzir a necessidade frequente de irrigação, a vegetação escolhida foi o Cacto Margarida (*Lampranthus productus*), que é da família das suculentas. Para efeito de impacto ambiental, a vegetação foi desconsiderada no estudo.

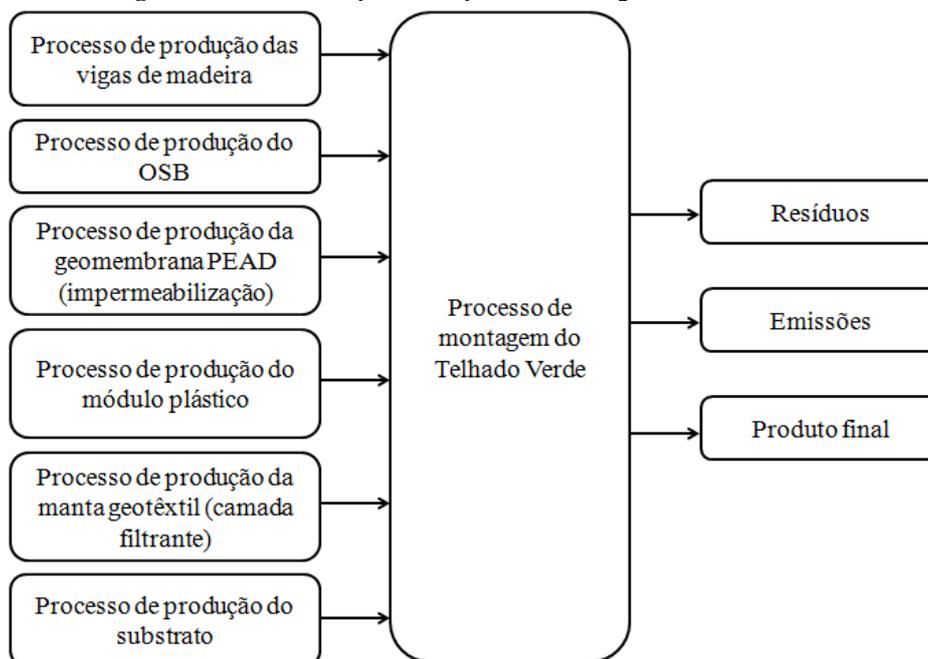
Figura 27: Suporte estrutural com vigas, fechamento em OSB e impermeabilização do telhado verde.



Fonte: Savi, 2012.

Observa-se que o sistema de telhado verde é formado por montagem através da união de vários fluxos de produção. O detalhamento de *inputs* e *outputs* está na Figura 28.

Figura 28: Fluxo de *inputs* e *outputs* da montagem do telhado verde.

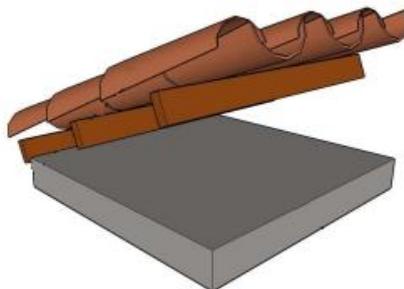


Fonte: Autora.

3.1.6 O sistema de telhado convencional (TC)

Para fins de comparação, foi avaliado o telhado de uma habitação com sistema convencional, constituído por laje de concreto armado e estrutura em armação de pontaletes e trama de terças, caibros e ripas de madeira com sombreamento com telha cerâmica tipo Plan, conforme apresentado na Figura 29. A laje é de forro de concreto maciço com espessura de 10 cm.

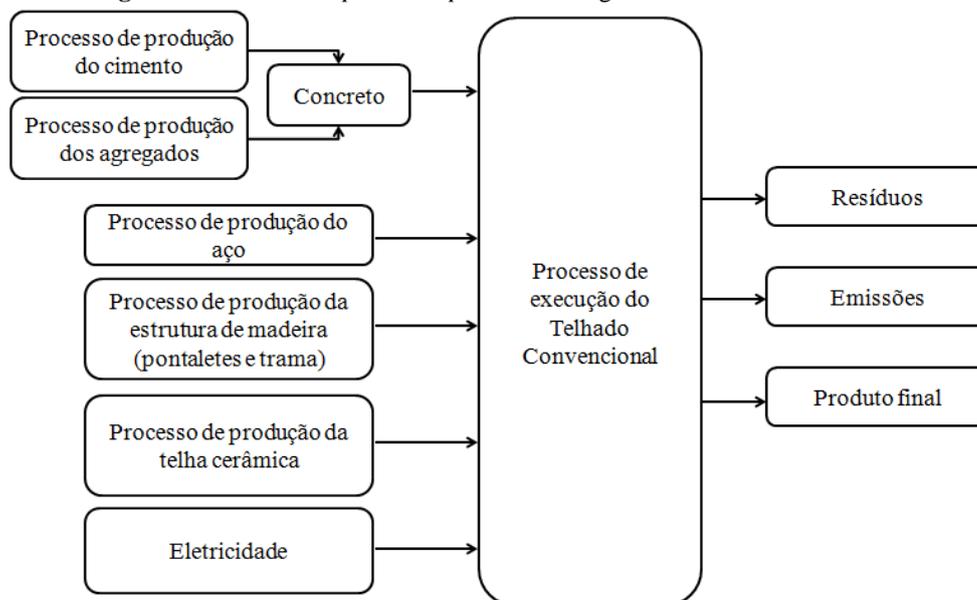
Figura 29: Detalhe da cobertura convencional (TC).



Fonte: Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (LabEEE - UFSC), 2011.

A laje maciça de concreto armado foi admitida como sendo construída por concreto usinado, com Fck de 30 MPa. A energia gasta na fase de execução (para adensamento do concreto) foi contabilizada. O detalhamento de *inputs* e *outputs* do sistema denominado telhado convencional está na Figura 30.

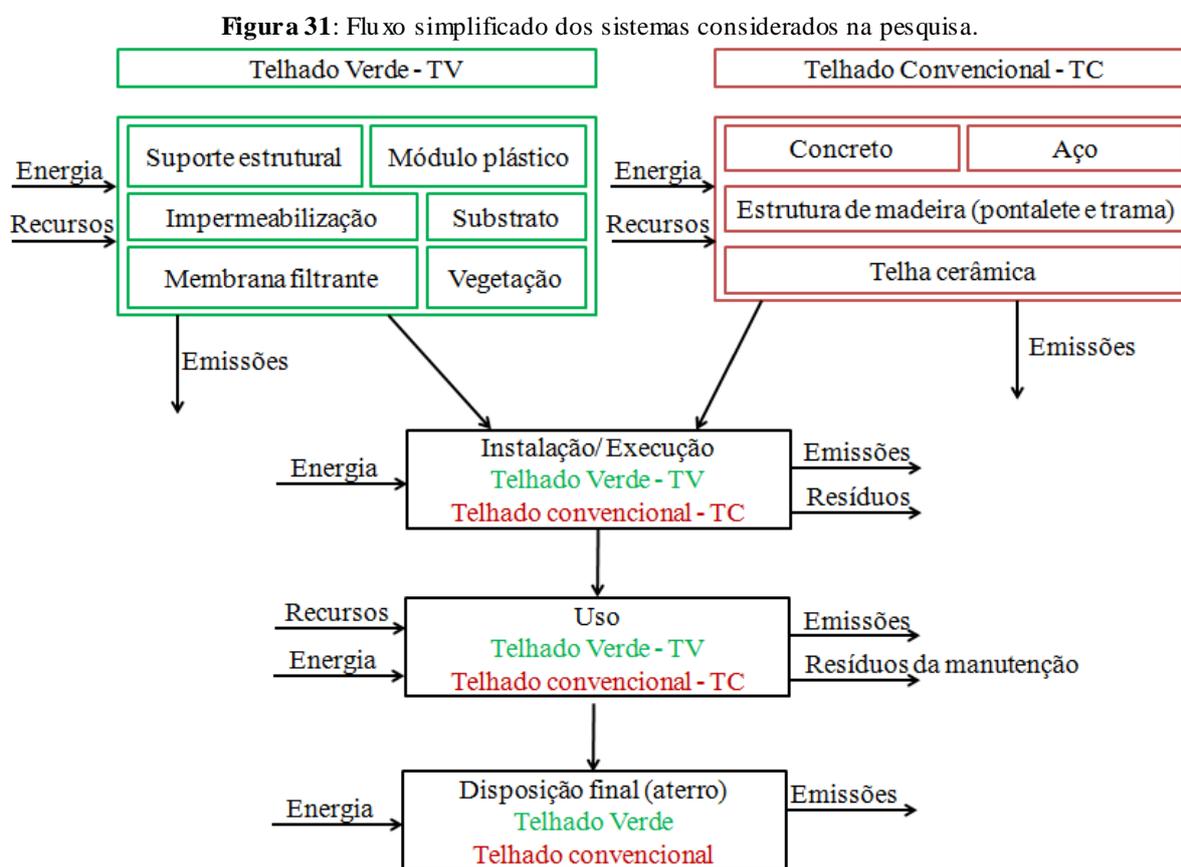
Figura 30: Fluxo de *inputs* e *outputs* da montagem do telhado convencional.



Fonte: Autora.

3.2 ETAPA 2: CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO

Cada fluxo (processo elementar de dados de entrada e saída) do processo produtivo para os sistemas, incluindo as fases analisadas na ACV está resumido na Figura 31.



Fonte: Autora.

O inventário de dados é a quantificação de entradas e saídas de um produto no seu ciclo de vida. Dessa forma, o quantitativo de cada material envolvido na execução e montagem do TV e TC está apresentado na Tabela 6. Foi escolhido cada material correspondente no banco de dados do software e seus detalhes de produção estão no Apêndice A e B.

As perdas foram incluídas, conforme descrito a seguir. Para os materiais com dimensões modulares, como OSB, Vigas de madeira (TV), manta de PEAD (para impermeabilização das chapas OSB) e manta geotêxtil para camada filtrante, o cálculo das perdas foi feito pela disposição manual de cada peça na cobertura. Para o módulo plástico não houve perda. Para o

substrato, a perda foi considerada a mesma da cal pela forma de aquisição para instalação (na concepção de Agopyan *et al.*, 1998).

No sistema convencional, a perda do concreto foi baseada em uma média calculada por Agooyan *et al.*, 1998, para concreto usinado. As perdas do aço, da estrutura de madeira e das telhas cerâmicas foram segundo Pedroso (2015). As perdas já estão embutidas na quantidade apresentada de cada material (Tabela 6).

A quantidade apresentada na Tabela 6 é referente à etapa de produção.

Tabela 6: Materiais e componentes dos sistemas de cobertura de telhado verde (TV) e telhado convencional (TC) estudados por unidade funcional (m² de cobertura).

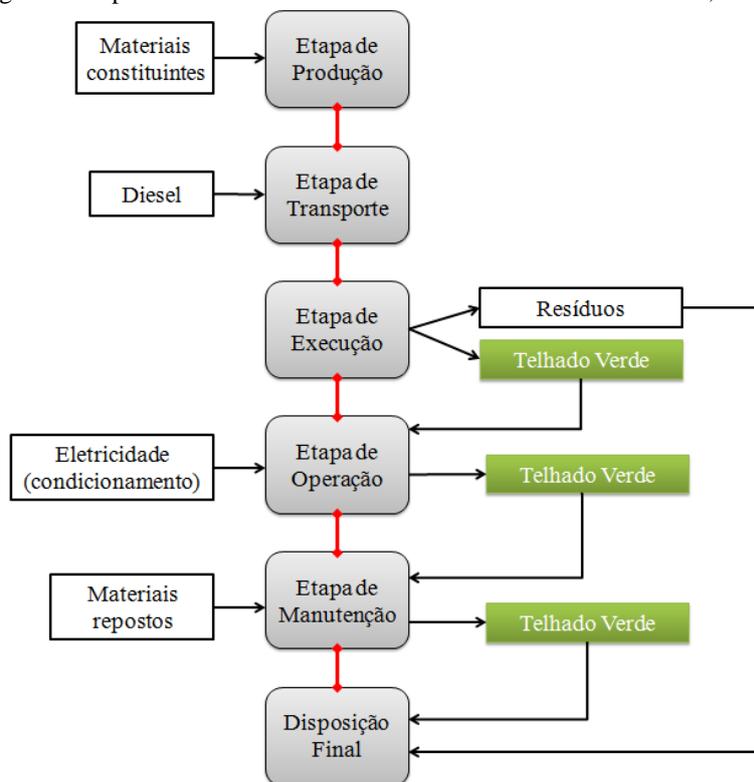
MATERIAIS E COMPONENTES		QUANTIDADE	PERDAS	TRANSPORTE (Km)	
TV	OSB	0,022	m ³	17%	28
	VIGAS DE ANGELIM PEDRA	0,02	m ³	6%	19
	MANTA PEAD	5,25	kg	5%	1399
	MÓDULO PLÁSTICO (PEAD)	5,80	kg	0%	2131
	MANTA GEOTÊXTIL	0,20	kg	18%	758
	SUBSTRATO	60,00	kg	12%	11
	VEGETAÇÃO CACTO MARGARIDA	1,00	m ²	-	-
TC	CONCRETO	0,10	m ³	9%	14
	AÇO	3,5	kg	10%	18
	ESTRUTURA DE ARMAÇÃO E TRAMA DE MADEIRA	0,04	m ³	15%	19
	TELHAS	86,20	kg	15%	25

Fonte: Autora.

Calculado, então, o quantitativo dos materiais que compõem cada sistema de cobertura, estes são inseridos no *software GaBi*. Como entendimento da leitura do *software*, cada material foi inserido dentro da etapa de ACV correspondente e, por isso, é denominado um dado de entrada. Cada dado de entrada é reconhecido pelo *GaBi* como sendo um fluxo de processos elementares de entrada. Os fluxos de saída são os produtos da etapa de ACV em questão, sejam eles resíduos e/ou o produto acabado. O fluxograma contendo os fluxos de entrada e

saída são apresentados nos Anexos A e B, mas uma simplificação (Figura 32) se mostrou necessária para ilustrar a leitura do *GaBi*.

Figura 32: Fluxograma simplificado ilustrando a leitura do software *GaBi* na ACV, como exemplo do TV.



Fonte: Autora.

Observa-se que um fluxo de saída é o telhado verde, que é o produto acabado citado como exemplo. O produto acabado é fluxo de saída em uma etapa de ACV, mas é fluxo de entrada da etapa seguinte.

As planilhas extraídas do *GaBi* foram adaptadas para o português com o quantitativo e a discriminação de entrada e saída (ver item 4.2.1).

3.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

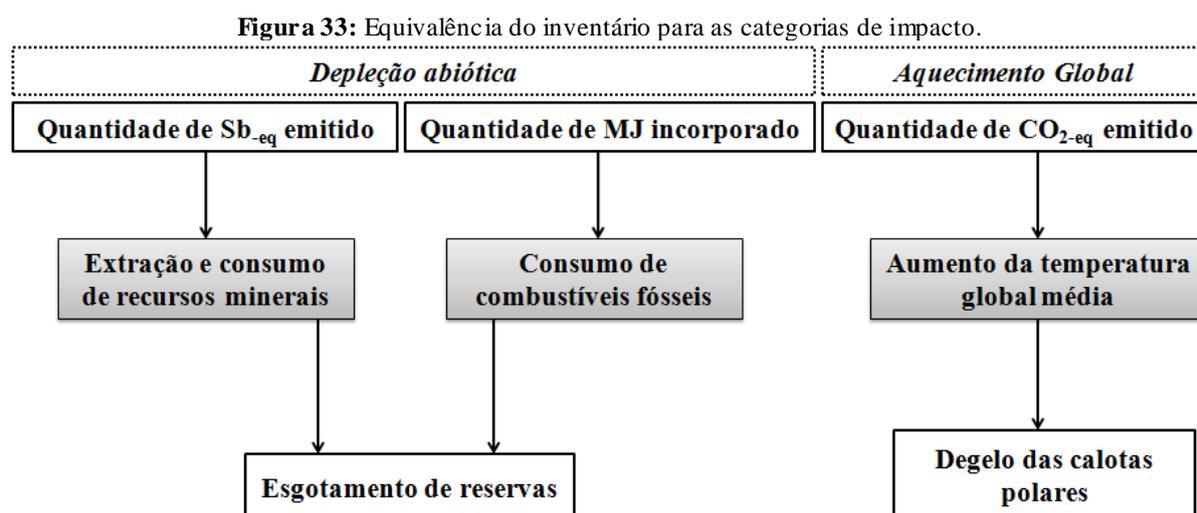
O *software* escolhido para conversão dos dados de entrada foi o *GaBi* v.6, base de dados profissional 2012, devido à sua disponibilidade no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (ENM/UnB). É de origem alemã e, juntamente com o *Umberto*, constitui a "rede de inventários de ciclo de vida

alemã" (MENDES, 2013). O *software* permite ao usuário escolher o tipo de método de avaliação das categorias de impacto dentre: *CML 2001*, *Impact 2002+*, *ReCiPe*, entre outros. Para esta pesquisa escolheu-se o *CML 2001*.

A escolha, dentro do *GaBi*, foi pelo método de avaliação de impacto CML 2001, que restringe a modelagem quantitativa aos estágios iniciais da cadeia causa-efeito para limitar as incertezas. Foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (Holanda). Os resultados são agrupados em categorias *midpoint* de acordo com mecanismos comuns (por exemplo, alterações climáticas) ou agrupamentos comumente aceitos (por exemplo, ecotoxicidade).

Como observado no item 2.4, de ACV em Telhados Verdes, o software mais utilizado pelos pesquisadores foi o *SimaPro*. Porém, segundo Herrmann *et al.* (2015), em uma análise com base em uma amostra aleatória com mais de 100 processos unitários, o resultado do *SimaPro* e do *GaBi* foram ou iguais ou quase iguais. As diferenças encontradas foram provenientes da base de dados utilizada em cada *software*. Portanto, não há significativas distinções que possam impedir a comparação dos resultados desta pesquisa com outras de similar conteúdo.

Neste estudo, um recorte foi feito para depleção abiótica e potencial de aquecimento global. O objetivo deste recorte é buscar os impactos ambientais globais, conforme apresentado na Figura 33.



Fonte: Autora.

3.4 ETAPA 4: INTERPRETAÇÃO

No presente trabalho, foram analisados a depleção abiótica e o potencial de aquecimento global (CO₂-eq), classificados dentro do uso de recursos e saúde humana, respectivamente.

A interpretação ocorreu de maneira isolada das categorias de impacto. Ou seja, a análise de depleção abiótica - extração de recursos, depleção abiótica - uso de combustíveis fósseis e aquecimento global.

Na fase de interpretação, foi feita uma verificação se o objetivo e o escopo definidos foram de fato atingidos.

Não obstante, nessa etapa houve a detecção dos pontos críticos. Ou seja, quais etapas foram responsáveis por maiores valores em determinada categoria ambiental e qual material (ou componente) foi o maior contribuinte dentro da mesma etapa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

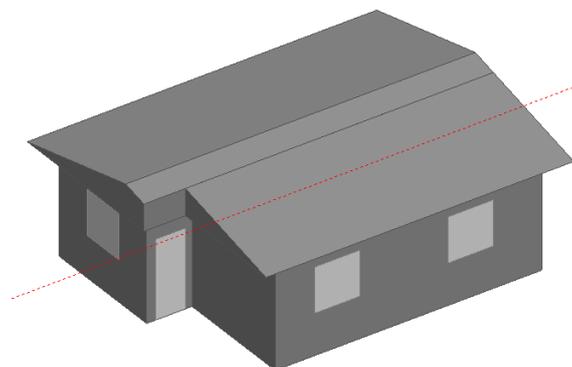
A habitação escolhida para o estudo de caso foi analisada com dois cenários distintos de sistema de cobertura: com o Telhado Verde (TV) e com o Telhado Convencional (TC). Ambos os cenários possuem o mesmo sistema de vedação vertical, composto por blocos cerâmicos com revestimento de argamassa mista de cimento, cal e areia, igual, portanto, para os dois sistemas.

Com base na etapa de interpretação de ACV, este capítulo se consolida na transformação de valores de emissões em dados concretos de impacto ambiental.

4.1 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA: *SOFTWARE DESIGN BUILDER*

Considerando apenas o uso de equipamento para condicionamento artificial, em toda a vida útil (50 anos) da habitação, sempre que necessário o acionamento do mesmo. A simulação foi feita no *software Design Builder* (Figura 34).

Figura 34: Modelo da habitação simulada no software.



Fonte: Caldas, 2016.

O consumo energético calculado foi de 489,79 kWh/ano para a habitação com TV e de 900,37 kWh/ano para a habitação com TC. Considerando que 1 kWh é equivalente a 3,6 MJ, encontrado por uma média dos últimos anos do Balanço Energético Nacional, foi feita a conversão dos resultados, já que o valor de entrada de energia no *software GaBi* é em MJ.

É necessário enfatizar que os resultados foram apenas para condicionamento artificial da habitação, considerando que é o diferencial dos dois sistemas analisados. Isto porque, o uso de equipamentos eletroeletrônicos permanece o mesmo, independentemente do tipo de vedação utilizado.

Em toda a fase de uso, no entanto, considerou-se a vida útil igual a 50 anos e unidade funcional de 1 m² de cobertura. Logo, os valores resultantes da simulação energética no *Design Builder* foram enquadrados nestas condições. Tem-se o resultado, em MJ, inserido no *GaBi* na Tabela 7.

Tabela 7: Consumo energético para condicionamento artificial na EO por ano e por unidade funcional.

Etapa Operacional	
TV	1760 MJ
TC	3240 MJ

Fonte: Autora.

Observou-se uma redução de 45,6% substituindo o TC por TV na mesma habitação e na mesma localização.

O motivo dessa diferença está na resistência térmica (Rt) de cada cobertura, relacionada com a transmitância térmica (U). Isto porque a Capacidade térmica (Ct) não apresentou diferença significativa entre os dois sistemas. Isso confirma que o TV possui maior resistência térmica a passagem de calor, proporcionando maior desempenho térmico dentro da habitação.

4.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

As planilhas com o quantitativo e a discriminação de entrada e saída estão reunidas nas Tabelas a seguir (Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10). Todas foram adaptadas¹⁹ do *GaBi* para melhor compreensão do fluxograma apresentado nos Anexos A e B. Novamente, é válido ressaltar que todos os valores apresentados estão por unidade funcional (1 m² de cobertura) e para todo o período admitido de vida útil da habitação (50 anos).

¹⁹ Os detalhes das planilhas foram explicados no item 3.2.

Tabela 8: Etapa de produção e execução dos sistemas TV e TC.

TV			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Seixo	Massa	27,4	kg
OSB (Oriented Strand Board)	Massa	13,2	kg
Poliéster Polioli [Plastics]	Massa	0,18	kg
Polietileno de alta densidade	Massa	0,09	kg
Areia	Massa	0,48	kg
Madeira sólida (softwood)	Massa	13,8	kg
Composto orgânico	Massa	32,1	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Telhado Verde (sistema montado)	Massa	87,3	kg
Resíduos da construção/instalação	Massa	6,12	kg
TC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Cimento (CEM I 32.5)	Massa	41,2	kg
Eletricidade (Etapa de construção)	Energia	2,7	MJ
Seixo	Massa	120	kg
Areia	Massa	111	kg
Telha Cerâmica	Massa	86,2	kg
Madeira (estrutura da cobertura)	Massa	35,9	kg
Aço	Massa	3,5	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Sistema Convencional construído	Massa	311	kg
Resíduos da construção/instalação	Massa	46,2	kg

Fonte: Autora.

Tabela 9: Etapa operacional dos sistemas TV e TC.

TV			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Eletricidade (condicionamento artificial)	Energia	1760	MJ
Telhado Verde (sistema montado)	Massa	87,3	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Telhado Verde (sistema montado)	Massa	87,3	kg

TC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Sistema Convencional construído	Massa	311	kg
Eletricidade (condicionamento artificial)	Energia	3240	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Sistema Convencional construído	Massa	311	kg

Fonte: Autora.

Tabela 10: Etapa de manutenção dos sistemas TV e TC.

TV			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Seixo	Massa	200	kg
Areia	Massa	5	kg
Composto orgânico	Massa	320	kg
Telhado Verde (sistema montado)	Massa	87,3	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Telhado Verde (sistema montado)	Massa	87,3	kg

TC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Sistema Convencional construído	Massa	311	kg
Telha Cerâmica	Massa	216	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Sistema Convencional construído	Massa	311	kg

Fonte: Autora.

Tendo o preenchimento das planilhas e inserção no fluxograma, o balanço foi calculado no *GaBi* e os resultados estão apresentados a seguir.

4.2.1 Resultado de depleção abiótica - uso de recursos naturais (kg Sb_{-eq})

O primeiro resultado da ACV, por fase, na categoria de depleção abiótica - uso de recursos naturais (kg Sb_{-eq}) está apresentado na Tabela 11. É o resultado detalhado por cada etapa da ACV e ainda com a sua respectiva contribuição (em porcentagem) para melhor visualização.

Tabela 11: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (kg Sb_{-eq}).

Sistema	Fase	Depleção Abiótica (10 ⁻⁹ kg Sb _{-eq})	
TV	Etapa de Produção (EP)	2154,9660	74,74%
	Etapa de Transporte (ET)	0,1920	0,01%
	Etapa de Execução (EE)	0,0140	0,00%
	Etapa Operacional (EO)	662,0640	22,96%
	Etapa de Manutenção (EM)	65,7850	2,28%
	Disposição Final (DF)	0,3490	0,01%
Total		2883,3700	100,00%
TC	Etapa de Produção (EP)	-722,1430	-37,01%
	Etapa de Transporte (ET)	28,2370	1,45%
	Etapa de Execução (EE)	1,7280	0,09%
	Etapa Operacional (EO)	1215,7290	62,30%
	Etapa de Manutenção (EM)	1427,1410	73,13%
	Disposição Final (DF)	0,7210	0,04%
Total		1951,4130	100,00%

Fonte: Autora.

Após a visualização da contribuição das etapas, é interessante conhecer os materiais que mais contribuíram para os resultados anteriormente apresentados. O *GaBi* apresenta um gráfico com os dados de entrada e sua contribuição no resultado total.

Na Tabela 12, esses dados foram listados em ordem decrescente de contribuição, adaptados do gráfico gerado pelo *software*.

Tabela 12: Materiais que mais contribuíram na categoria depleção abiótica (kg Sb_{-eq}).

Depleção Abiótica (de recursos) [kg Sb _{-eq}]	TV		TC
	1	OSB (<i>Oriented Strand Board</i>)	Aço
2	Manta geotêxtil (Poliéster)	Telha cerâmica (manutenção)	
3	Eletricidade	Eletricidade (uso)	
4	Vigas de madeira	Telha cerâmica (produção)	
5	Brita (manutenção)	Madeira	

Fonte: Autora.

No TV, observa-se a contribuição maciça da etapa de produção (representa quase 75% do total). Isso pode ser confirmado pelo ranking dos materiais, no qual três (dos cinco apresentados) são constituintes da etapa de produção, especialmente o OSB e a manta geotêxtil (feita de 100% de poliéster). A outra representação significativa é a etapa operacional, onde o consumo de energia elétrica foi o terceiro maior contribuinte da categoria para o TV.

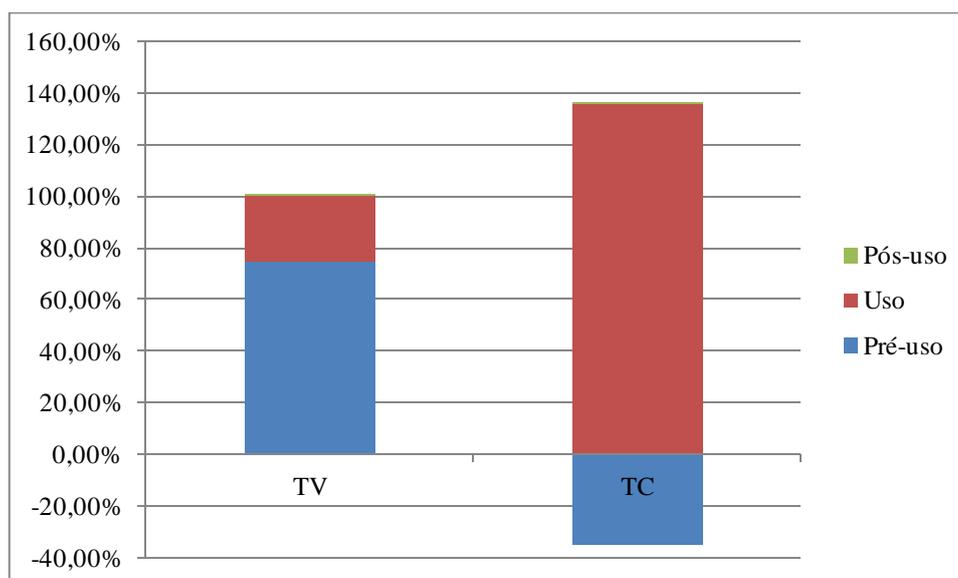
Outro dado relevante é que a reposição constante do substrato, na etapa de manutenção, atribuiu o consumo de brita para o ranking em quinta posição. Essa etapa corresponde a menos de 3%. As etapas de transporte e disposição final não são representativas nesta categoria.

O TC apresentou um dado curioso. O valor da depleção abiótica da etapa de produção foi um valor negativo, atribuído ao aço utilizado na laje. Segundo Yellishetty *et al.* (2011) os impactos ambientais da mineração e processamento de recursos minerais são o principal problema desta categoria. Isto porque, segundo os próprios autores, a indústria siderúrgica produz numerosas ligas (ou tipos de aço), que, por sua vez, exigem recursos minerais e metálicos abrangentes. Portanto, esse material foi o de maior contribuição (em módulo), ultrapassando o esgotamento das reservas disponíveis de minérios (valor negativo de Sb_{-eq}).

A etapa de manutenção foi a que teve maior valor de depleção abiótica total, seguida bem próxima pela etapa operacional. Justamente pela maior contribuição da telha cerâmica (reposta 2,5 vezes durante a vida útil da habitação) e consumo de eletricidade, respectivamente. Portanto, a preocupação com componentes de sistemas construtivos adequados ao clima regional se torna uma grande aliada com a redução de impactos gerados.

O resultado, portanto, para a fase da ACV baseada no uso (pré-uso, uso e pós-uso) é apresentado na Figura 35.

Figura 35: Resultado de depleção abiótica (kg Sb_{-eq}) por fase dos sistemas.

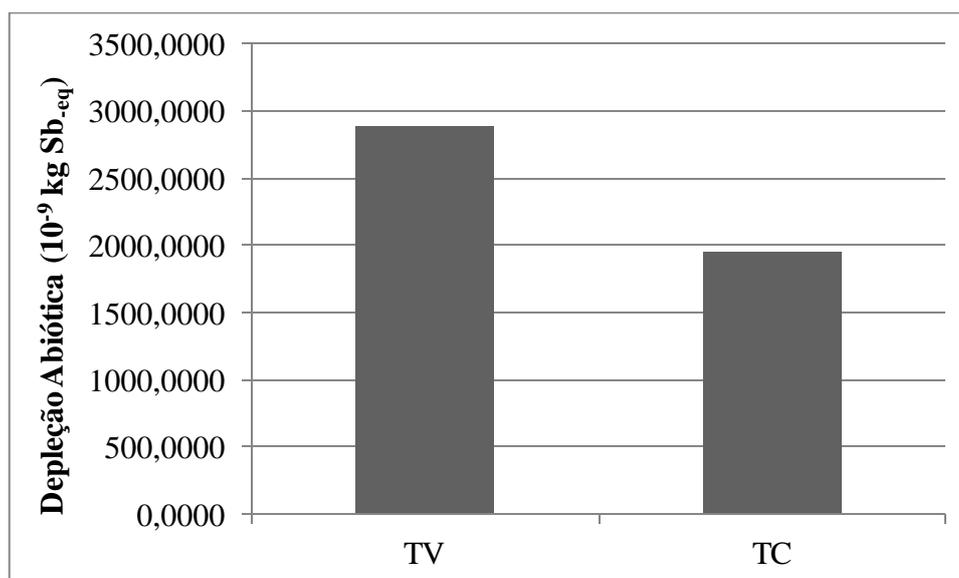


Fonte: Autora.

A fase de pré-uso no TV merece maior atenção por ter sido a responsável por quase 80% do total deste sistema. Já no TC, a fase de uso pelo consumo de eletricidade para condicionamento artificial e reposição de telha cerâmica na manutenção. A fase de pós-uso não é representativa diante das demais fases.

A comparação dos dois sistemas analisados, em termos absolutos, é apresentada na Figura 36. Observa-se a grande diferença entre o TV e o TC. A substituição de uma cobertura convencional por uma cobertura em telhado verde proporcionou um aumento de quase 50% na preservação das reservas disponíveis de recursos naturais.

No estudo de Chenani *et al.* (2015) as duas alternativas de telhado verde resultaram em 0,09 kg Sb-eq e 0,177 kg Sb-eq. Resultado superior ao apresentado neste item, em uma ordem de grandeza de 4 a 5. Semelhante ao resultado do estudo de Peri *et al.* (2012), que atribuiu à utilização de produtos oriundos do petróleo (óleos e gás natural) utilizados na forma bruta.

Figura 36: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (kg Sb_{-eq}), em total absoluto.

Fonte: Autora.

4.2.2 Resultado de depleção abiótica - uso de combustíveis fósseis (MJ)

O resultado da categoria de depleção abiótica - uso de combustíveis fósseis (MJ) está detalhado por etapa da ACV e ainda com a sua respectiva contribuição (em porcentagem) na Tabela 13.

Tabela 13: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (MJ).

Sistema	Fase	Depleção Abiótica (MJ)	
TV	EP	202,2843	25,11%
	ET	0,8097	0,10%
	EE	0,0599	0,01%
	EO	561,5025	69,69%
	EM	39,5938	4,91%
	DF	1,4707	0,18%
TOTAL		805,7209	100,00%
TC	EP	879,5636	26,89%
	ET	119,0738	3,64%
	EE	3,8729	0,12%
	EO	1031,0708	31,52%
	EM	1234,3542	37,74%
	DF	3,0391	0,09%
TOTAL		3270,9744	100,00%

Fonte: Autora.

Na Tabela 14, encontram-se os dados de entrada em ordem decrescente de contribuição, adaptados do gráfico gerado pelo *software*.

Tabela 14: Materiais que mais contribuíram na categoria depleção abiótica (MJ).

	TV	TC
Depleção Abiótica (combustíveis fósseis) [MJ]	1 Eletricidade	Telha cerâmica (manutenção)
	2 Vigas de madeira	Eletricidade
	3 OSB (Oriented Strand Board)	Telha cerâmica (produção)
	4 Brita (manutenção)	Madeira
	5 Manta geotêxtil (Poliéster)	Diesel

Fonte: Autora.

O TV apresentou sua maior contribuição para depleção abiótica na etapa operacional (quase 70%), tanto é que a eletricidade foi o dado de entrada com maior representatividade no total desta categoria. Ainda por ter sido a maior contribuinte na depleção, a etapa operacional do TV é praticamente a metade da operacional do TC (ver Tabela 13). Isto porque a habitação com TC apresentou desvantagem no desempenho térmico, refletindo diretamente no resultado de um expressivo impacto ambiental.

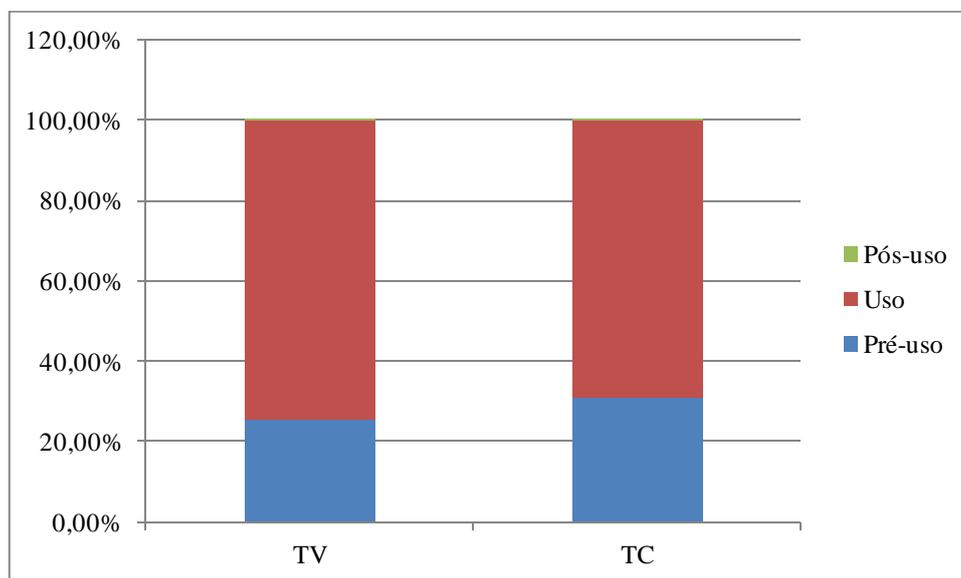
A etapa de produção respondeu por cerca de 25% do total, por causa do uso de madeira (vigas e OSB) como pela manta geotêxtil (constituída de poliéster). A etapa de manutenção representou menos de 5% do total, mas esse valor foi quase que exclusivamente pelo uso de brita na reposição do substrato, já que esse é o único material de manutenção que aparece no ranking do TV.

No TC, a etapa de manutenção foi a maior responsável no total de depleção abiótica (combustíveis fósseis), seguida logo depois pela etapa operacional. Essa contribuição da manutenção é pela reposição da telha cerâmica. A etapa de produção também teve alta representatividade, especialmente pela utilização de madeira.

O material que liderou o resultado de depleção abiótica foi a telha cerâmica, especialmente pela sua fabricação, proveniente da queima de combustíveis fósseis. Um dado interessante nesta categoria é a elevada contribuição de diesel na etapa de transportes para o TC. A diferença, para o TV, é a grande quantidade (em massa) de materiais e componentes sendo transportados na etapa de produção do TC (vide fluxograma no Anexo B).

Na Figura 37, pode ser feita uma visualização por fase do total de MJ para cada sistema. Observa-se que a fase de uso é a maior contribuinte nos dois sistemas, seguidos da fase de pré-uso.

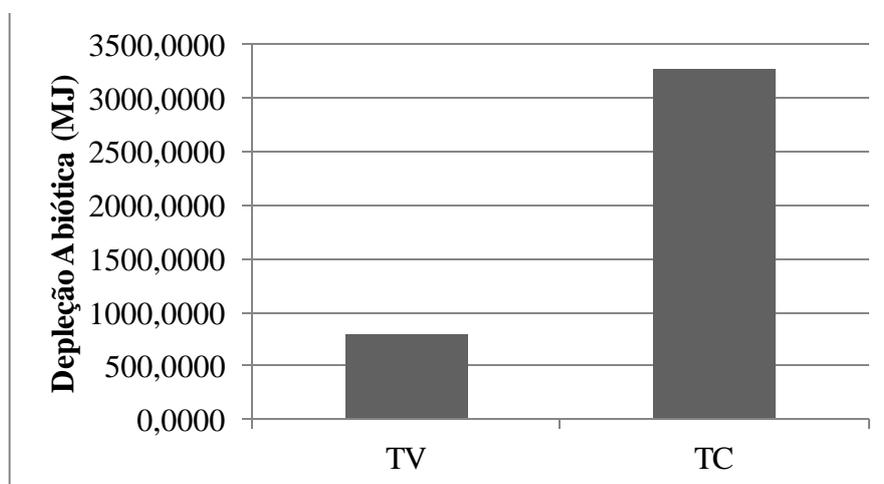
Figura 37: Resultado de depleção abiótica (MJ) por fase dos sistemas.



Fonte: Autora.

A comparação dos dois sistemas analisados, em termos absolutos, é apresentada na Figura 38. Observa-se a grande diferença entre o TV e o TC. A substituição de uma cobertura convencional por uma cobertura em telhado verde gera uma redução de 75% do uso de combustíveis fósseis.

Figura 38: Resultado da ACV por fase na categoria depleção abiótica (MJ) em total absoluto.



Fonte: Autora.

Os estudos que analisaram o consumo energético na fase de uso, também concluíram diferenças significativas no uso de TV. Podem ser citados: Kosareo; Ries (2007), Hong *et al.* (2012) e Kim *et al.* (2012). Em valor absoluto, o resultado encontrado por Cubi *et al.* (2015) foi de 690000 MJ e 1200000 MJ para o estudo de El Bachawati *et al.* (2016).

4.2.3 Resultado de potencial de aquecimento global (kg CO_{2-eq})

O resultado da categoria de potencial de aquecimento global (emissões de CO_{2-eq}) está detalhado por etapa da ACV e ainda com a sua respectiva contribuição (em porcentagem) na Tabela 15.

Tabela 15: Resultado da ACV por fase na categoria potencial de aquecimento global (kg CO_{2-eq}).

Sistema	Fase	Potencial de Aquecimento Global (kg CO _{2-eq})	
TV	EP	14,6116	3,72%
	ET	0,0972	0,02%
	EE	0,0043	0,00%
	EO	374,5215	95,33%
	EM	3,53645	0,90%
	DF	0,1037	0,03%
TOTAL		392,8748	100,00%
TC	EP	88,9052	10,12%
	ET	8,4171	0,96%
	EE	0,7906	0,09%
	EO	687,7229	78,30%
	EM	92,2748	10,51%
	DF	0,2190	0,02%
TOTAL		878,3296	100,00%

Fonte: Autora.

Na Tabela 16, encontram-se os dados de entrada em ordem decrescente de contribuição, adaptados do gráfico gerado pelo *software*.

No TV, o potencial de aquecimento global se concentrou na etapa operacional (95% aproximadamente). A etapa de produção representou quase 4%. O dado de entrada com maior contribuição nas emissões de CO_{2-eq} foi o uso de eletricidade, na etapa operacional. O segundo foi a brita, na etapa de manutenção.

Tabela 16: Materiais que mais contribuíram na categoria potencial de aquecimento global (kg CO₂-eq).

	TV	TC
Potencial de Aquecimento Global [kg CO ₂ -eq]	1 Eletricidade	Eletricidade
	2 Brita (manutenção)	Telha cerâmica (manutenção)
	3 Manta geotêxtil (Poliéster)	Telha cerâmica (produção)
	4 OSB (<i>Oriented Strand Board</i>)	Cimento
	5 Vigas de madeira	Madeira

Fonte: Autora.

Um ponto a ser discutido é que OSB e as vigas de madeira tiveram maiores contribuição em módulo, pois apresentaram valores negativos para o potencial de aquecimento global. O que ocorre é que ambos os materiais provêm de plantas, que, enquanto vivas, absorveram o gás carbônico no processo de respiração e posteriormente o liberaram no processo de processamento. Houve, portanto, uma compensação de cunho polêmico para ambientalistas. É certo que a extração da matéria-prima para o processamento desses materiais deve acontecer em florestas plantadas.

No TC, a etapa operacional foi a maior representante da categoria (com quase 80%), seguida da etapa de produção e manutenção (aproximadamente 10%, cada). Isso corresponde à lista de materiais mais contribuintes no TC no potencial de aquecimento global. São eles:

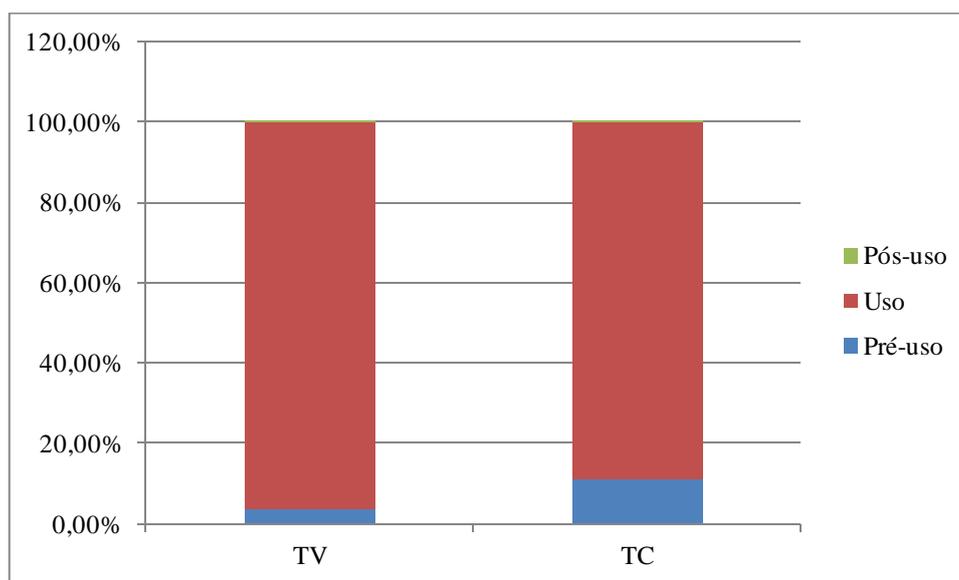
- Eletricidade, com o primeiro lugar, condizendo com a alta contribuição da EO;
- A telha cerâmica, tanto na manutenção, como na produção, nessa ordem. Isto porque a quantidade utilizada na manutenção é 2,5 vezes a utilizada na produção, pela vida útil do material e sua necessidade de reposição. A telha cerâmica da EM assumiu sozinha a contribuição da EM no potencial total, até mesmo por ser o único material com necessidade de ser substituído;
- A telha cerâmica da produção contribuiu com igual valor do cimento na etapa de produção. Observou-se que, em todas as categorias anteriormente citadas, apenas no potencial de aquecimento global o cimento surgiu, porém, de forma bem significativa.

Na etapa de produção, o TC superou as emissões do TV em seis vezes mais. Isso mostra a favorável escolha da estrutura de vigas e fechamento em madeira em detrimento de uma cobertura convencional, de laje de concreto armado e utilização de telha cerâmica. Porém, vale ressaltar que esse favorecimento ocorreu nesta categoria. O TC foi superior ao TV em

todas as etapas, não apenas na produção, o que conduz a enfatizar a importância do desempenho térmico nas emissões de GEE.

Na Figura 39, pode ser visualizado o potencial de aquecimento global para cada sistema, por fase.

Figura 39: Resultado de potencial de aquecimento global (kg CO₂-eq) por fase dos sistemas.



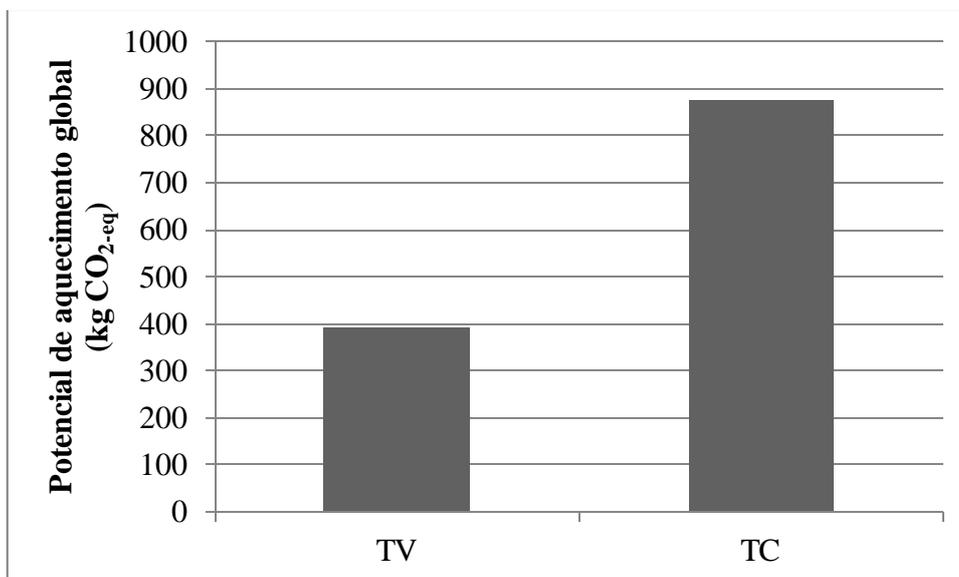
Fonte: Autora.

A fase de uso, novamente, foi a que maior contribuiu em cada um dos sistemas. A fase de pós-uso não foi significativa e a fase de produção representou uma maior contribuição em relação ao valor total de TC.

A comparação dos dois sistemas analisados, em termos absolutos, é apresentada na Figura 40. Observa-se a diferença entre o TV e o TC. A substituição de uma cobertura convencional por uma cobertura em telhado verde leva a uma redução de mais da metade nas emissões de CO₂-eq.

Comparando o resultado deste estudo com os demais encontrado na literatura, tem-se que Kosareo; Ries (2007) concluíram que o TV extensivo correspondeu a cerca 60% do telhado referência, enquanto neste estudo foi de, aproximadamente, 45%. Peri et al. (2012) contabilizou 79,6 kg CO₂-eq e atribuiu às emissões de dióxido de carbono e metano. O TV de Cubi et al. (2015) totalizou 34000 kg CO₂-eq, enquanto o de El Bachawati et al. (2016), 98000 kg CO₂-eq.

Figura 40: Resultado da ACV por fase na categoria potencial de aquecimento global (kg CO₂-eq) em total absoluto.



Fonte: Autora.

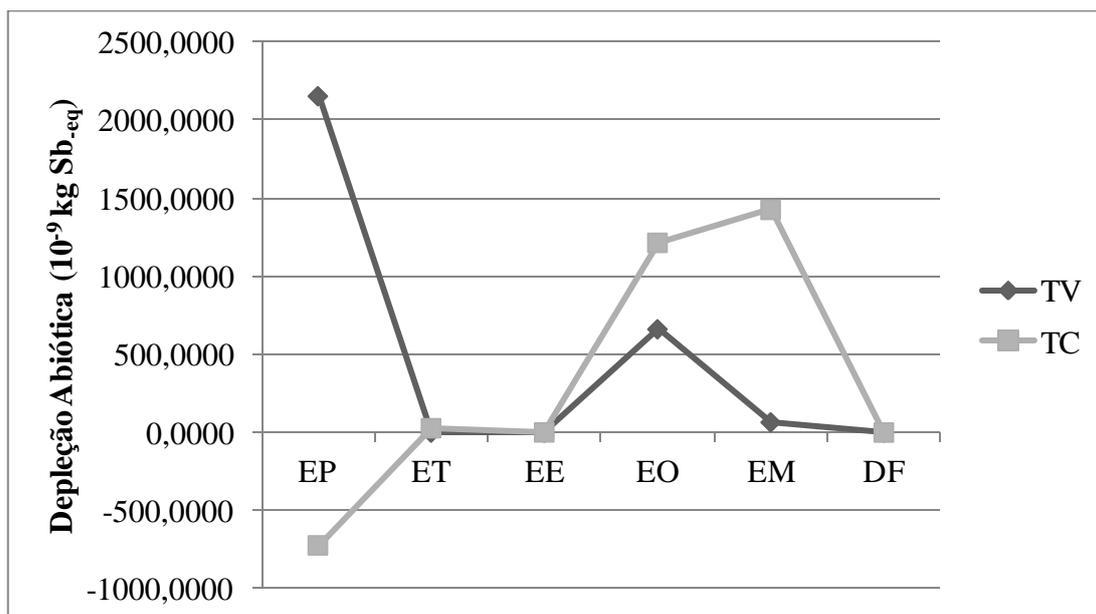
Em se tratando de ACV, cada estudo possui limitações e variáveis de pesquisa que aumentam a diferença para cada resultado. Como o objeto de estudo é um telhado verde, as diferenças se amplificam, pela gama de variedade de materiais que o compõem, espessuras e modelos diferentes.

4.2.4 Resultado geral por etapa de ACV

A seguir, tem-se o resultado por cada etapa da ACV do TV e do TC.

Observou-se que as etapas de transporte, execução e disposição final foram pouco expressivas no impacto da depleção abiótica - uso de recursos. A maior disparidade entre os sistemas TV e TC ocorreu na etapa de produção, seguida da etapa de manutenção e, por fim, da etapa operacional (Figura 41).

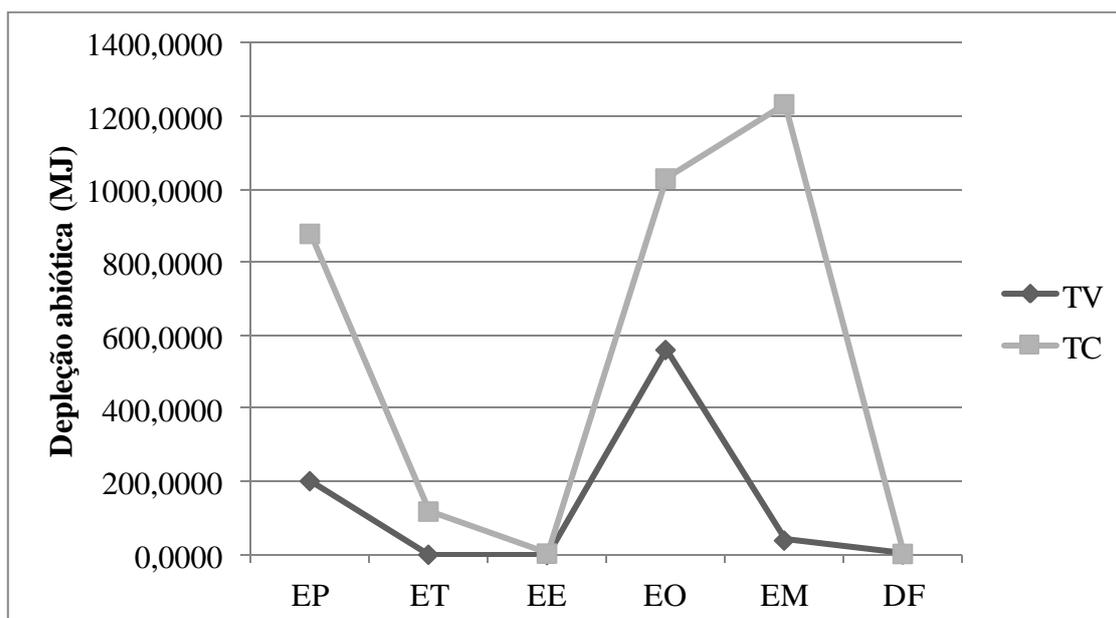
Figura 41: Resultado por etapa isolada da ACV na categoria depleção abiótica (kg Sb_{eq}).



Fonte: Autora.

Na depleção abiótica - combustíveis fósseis, a maior disparidade ocorreu na etapa de manutenção, seguida da etapa de produção e, em seguida, da etapa operacional. A depleção abiótica - combustíveis fósseis foi a única categoria no qual a etapa de transporte apresentou alguma diferença significativa entre os dois sistemas. Novamente, a etapa de execução e disposição final não se mostraram representativas diante do total (Figura 42).

Figura 42: Resultado por etapa isolada da ACV na categoria depleção abiótica (MJ).

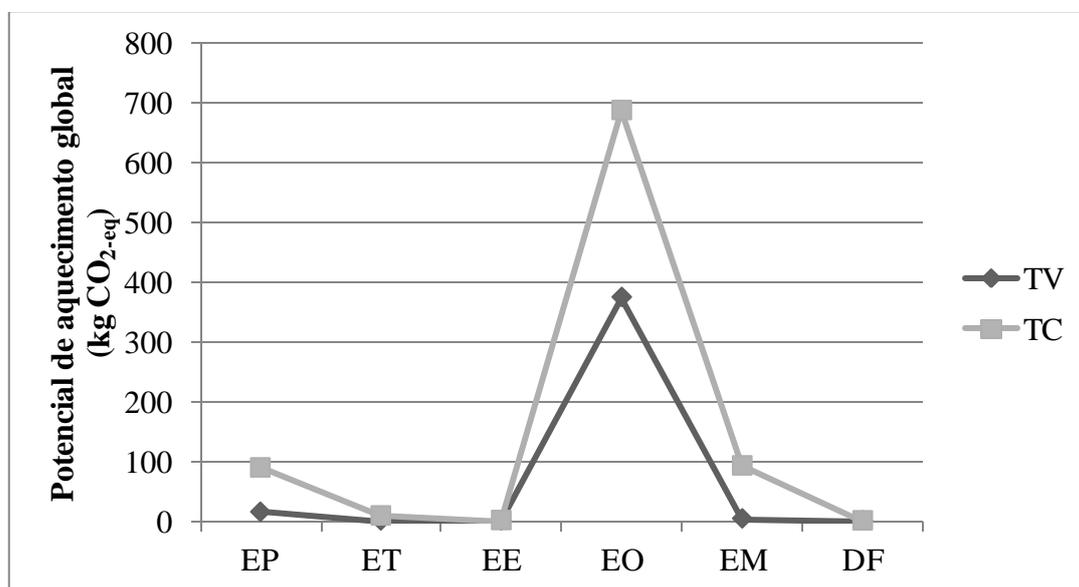


Fonte: Autora.

Na EE do TV, foi considerada apenas a disposição dos resíduos de execução em aterro, diferentemente do que ocorreu no TC, onde a EE possui também consumo energético e, assim, foi a categoria de impacto que mais apresentou diferença.

No potencial de aquecimento global, ou emissões de CO₂-eq, a etapa operacional apresentou a maior diferença efetiva entre os dois sistemas, especialmente pelas emissões de GEE pelo equipamento de condicionamento. A etapa de manutenção e produção apresentaram diferença devido a utilização de telha cerâmica na composição do TC. A etapa de transporte, execução e disposição final novamente se mostraram inexpressivas (Figura 43).

Figura 43: Resultado por etapa isolada da ACV na categoria potencial de aquecimento global (kg CO₂-eq).



Fonte: Autora.

4.2.5 Discussões relevantes

Observou-se a maior discrepância de resultados na depleção abiótica (uso de combustíveis fósseis), em que o resultado do TC foi de 400% o valor de TV, seguido pelo potencial de aquecimento global, em que o TC superou o dobro do resultado de TV. A menor diferença encontra-se na depleção abiótica (uso de recursos naturais), no qual houve um aumento de pouco mais de 20% no TC, em relação ao TV.

Na fase de produção, a utilização de materiais cerâmicos e de aço foi crucial para o maior impacto provocado por TC em todas as categorias analisadas.

A fase de execução do TC também consumiu energia elétrica, porém, em tão pouca quantidade, se comparada ao consumo para condicionamento em toda a vida útil da habitação, que não apresentou representatividade.

Pela etapa de execução, foi observado que o fato de não consumir eletricidade, por ser um sistema de montagem, favoreceu o desempenho ambiental em todas as categorias analisadas. A utilização de energia, ainda que apenas 2,7 MJ, para execução do TC foi responsável por mais de 100 vezes mais consumo de Sb_{-eq} , aproximadamente 60 vezes mais consumo em MJ e quase 200 vezes mais emissão de CO_{2-eq} em relação ao sistema de TV, considerando também o transporte de resíduos para o aterro.

A etapa operacional foi a maior contribuinte nas categorias de depleção abiótica (uso de combustíveis fósseis) e potencial de aquecimento global.

O potencial de aquecimento global, analisando por fase, foi muito maior no TC em relação ao TV. A etapa de produção do TC foi quase seis vezes maior que a etapa de produção do TV. A etapa de transporte foi quase 100 vezes maior no TC em relação ao TV; a etapa de execução foi quase 200 vezes maior. A etapa operacional, como esperado pelo consumo energético, foi quase o dobro para o TC. A maior diferença, no entanto, foi na etapa de manutenção que aumentou de 3,5 kg CO_{2-eq} (TV) para 92 kg CO_{2-eq} (TC), cerca de 2 mil vezes mais, o que sobrecarregou ainda mais a diferença entre os sistemas na fase de uso.

A fase de pós-uso teve participação praticamente nula. Isso reitera uma discussão de alguns pesquisadores sobre a consideração ou não da etapa de transportes, já que a disposição final foi apenas o deslocamento do resíduo para o aterro.

5 CONCLUSÃO

A avaliação do ciclo de vida dos dois sistemas de cobertura analisados (telhado verde – TV e telhado convencional - TC) foi feita para duas categorias de impacto: depleção abiótica e potencial de aquecimento global.

O consumo energético na etapa operacional para condicionamento ambiental da edificação com telhado verde (TV) foi 45,6% menor que a mesma edificação com telhado convencional (TC). Esse resultado está diretamente relacionado com a transmitância térmica (U) de cada sistema. Ou seja, a relação é estreita com a transmitância térmica, visto que a capacidade térmica (C_T) é praticamente a mesma dos dois sistemas. Quanto menor o valor de U, menor é o consumo energético.

Uma contribuição importante deste estudo é a conversão de consumo energético em categorias de impacto, inserida no *GaBi*. Assim, foi possível observar o real impacto da etapa operacional para correlacionar com o desempenho térmico dos sistemas de cobertura.

A fase de uso foi a que apresentou maior valor de depleção abiótica e potencial de aquecimento global. A única exceção foi a depleção abiótica (uso de recursos naturais) do TV, em que a fase de pré-uso superou a fase de uso.

A partir de resultados do *GaBi*, foi possível elencar os materiais (ou dados de entrada) responsáveis pela maior contribuição em cada categoria de impacto. Assim sendo, é possível a proposta de substituição dos mesmos, a partir dos resultados deste estudo.

Dentre os vários elementos que constituem o TV, a camada filtrante, aqui proposta de uma manta geotêxtil (feita com poliéster), apresentou maior contribuição dentro do TV. É possível, a partir disso, propor materiais para compensar e melhorar seu desempenho ambiental.

O cimento, no TC, se mostrou impactante apenas na categoria de potencial de aquecimento global, pelo seu processo de fabricação. Na categoria de depleção abiótica (uso de recursos), a madeira surge como um dos itens mais relevante nas contribuições, apesar de ser um material biótico. Isso ocorre pelo fato de que a madeira não foi utilizada em sua forma pura, mas sim, passou por um processo de fabricação que incorpora diversos elementos.

Apesar do TV ter apresentado desempenho ambiental melhor que o TC, na maioria das etapas, ainda é possível melhorar pela substituição da manta geotêxtil e do uso de madeira. Da

mesma forma, observou-se que a telha utilizada no TC no país deve ser reconsiderada. Isto porque o processo de fabricação da telha cerâmica é ofensivo ao meio ambiente. Além disso, o uso de cimento e aço também deve ser reconsiderado pela indústria da construção civil, pela elevada carga ambiental, além do desempenho térmico desfavorável que acarreta em aumento do consumo energético para atingir o conforto.

A substituição do TC utilizado no país, por uma proposta de cobertura em TV é promissora, já que foram vistas melhorias ambientais nas categorias de impacto analisadas nesse estudo.

A melhora do desempenho ambiental do TV, na etapa de execução, reforça a vantagem da utilização de sistemas com menor demanda energética para execução/instalação e, assim, alcançar a redução do consumo energético nas construções do país.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Observa-se, com esta pesquisa, que se deve investir em estudos e aplicação de coberturas mais sustentáveis e inovadoras para ter sistemas mais racionalizados e eficientes energeticamente.

Recomenda-se a análise de sensibilidade, inclusive na durabilidade e vida útil dos materiais que constituem os sistemas. O estudo orientado para outras categorias de impacto também se faz necessário, visto que a análise conjunta das categorias gera uma visão global sobre determinado sistema ou produto.

Com a influência observada de U com o consumo energético, a localização da habitação influenciou nos resultados. Aconselha-se, então, o estudo de outras zonas bioclimáticas brasileiras para comparação com a presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.575-4**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR ISO 14040**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR ISO 15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT, 2005. 30 p.

AGOPYAN, V. et al. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras**. Relatório Final. PCC-USP/FINEP/ITQC, 5 volumes. 1355 p. Setembro de 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM E 2396**. Test Method for Saturated Water Permeability of Granular Drainage Media [Falling-Head Method] for Vegetative (Green) Roof Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

_____. **ASTM E 2397**. Practice for Determination of Dead Loads and Live Loads Associated with Vegetative (Green) Roof Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

_____. **ASTM E 2398**. Test Method for Water Capture and Media Retention of Geocomposite Drain Layers for Vegetative (Green) Roof Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

_____. **ASTM E 2399**. Test Method for Maximum Media Density for Dead Load Analysis of Vegetative (Green) Roof Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

_____. **ASTM E 2400**. Guide for Selection, Installation, and Maintenance of Plants for Green Roof Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **ASTM E 2777**. Standard Guide for Vegetative (Green) Roof Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

_____. **ASTM E 2788**. Specification for Use of Expanded Shale, Clay and Slate (ESCS) as a Mineral Component in the Growing Media and the Drainage Layer for Vegetative (Green) Roof Systems. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

ATMACA, A.; ATMACA, N. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO₂A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Buildings**. v. 102. p. 417 – 431. 2015.

BERARDI, U. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. **Energy And Buildings**. v. 121, p.217-229, 2016.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, v. 48, p.57-65, 2012.

BLACKHURST, M.; HENDRICKSON, C.; MATTHEWS, H. S. Cost-Effectiveness of Green Roofs. **Journal of Architectural Engineering**, v. 16, p.136-143, 2010.

BLENGINI, G.; Di CARLO, T. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p.869-880, jun. 2010.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética EPE. **Balanco Energético Nacional 2015 ano base 2014**. Brasil, 2015.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética EPE. **Balanco Energético Nacional 2016 ano base 2015**. Brasil, 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima, **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2013. Brasília.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima, **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2014. Brasília.

BRITISH STANDARD. **EN 15804**: 2013. Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. Brussels: European Committee For Standardization, 2013. 70 p.

CALDAS, L. R. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO₂ de uma edificação habitacional unifamiliar de *Light Steel Framing***. Dissertação de Mestrado em

Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174 p. 2016.

CALDEIRA, L. R. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético na fase de pré-uso de telhas termoacústicas com poliestireno expandido para edificação habitacional no DF.**

Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 187 p. 2016.

CANEGHEM, J.; Vermeulen, I.; Block, C.; Cramm, P.; Mortier, R.; Vandecasteele, C. Abiotic depletion due to resource consumption in a steelwork assessed by five different methods. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 54, n. 12, p.1067-1073, out. 2010.

CATALANO, C.; MARCENÒ, C.; LAUDICINA, A.; GUARINO, R.. Thirty years unmanaged green roofs: Ecological research and design implications. **Landscape And Urban Planning**, v. 149, p.11-19, 2016.

CBCS. CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL; PNUMA – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE; MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas.** Versão 1, 2014, 111p.

CERÓN-PALMA, I.; SANYÉ-MENGUAL, E.; OLIVER-SOLÀ, J.; MONTERO, J.; PONCE-CABALLERO, C.; RIERADEVALL, J. Towards a green sustainable strategy for social neighborhoods in Latin America: Case from social housing in Merida, Yucatan, Mexico. **Habitat International**, v. 38, p.47-56, 2013.

CHAU, C.; LEUNG, T.; NG, W. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, p.395-413, abr. 2015.

CHENANI, S. B.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p.153-162, 2015.

COMA, J.; PÉREZ, G.; SOLÉ, C.; CASTELL, A.; CABEZA, L. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable Energy**, v. 85, p.1106-1115, 2016.

CONTARINI, A.; MEIJER, A. LCA comparison of roofing materials for flat roofs. **Smart and Sustainable Built Environment**, Vol. 4, p.97 - 109, 2015.

CUBI, E.; ZIBIN, N.; THOMPSON, S.; BERGERSON, J. Sustainability of Rooftop Technologies in Cold Climates: Comparative Life Cycle Assessment of White Roofs, Green Roofs, and Photovoltaic Panels. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, p.249-262, 2015.

DESIGNBUILDER. **Site oficial do software Design Builder**. Disponível em: <<http://www.designbuilder.co.uk/content/view/7/13/>>. Acesso em 10/07/2016.

EL BACHAWATI, M. et al. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of traditional gravel ballasted, white reflective, and vegetative roofs: A Lebanese case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p.833-842. 2016.

ESTADO DE SANTA CATARINA (Estado). **Lei N° 14.243. Santa Catarina, 2007.**

ESTADO DO PIAUÍ (Estado). **Lei N° 6888. Piauí, 2016.**

FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. 2012. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GAN, V.; CHENG, J.; LO, I.; CHAN, C. Developing a CO₂-e accounting method for quantification and analysis of embodied carbon in high-rise buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 825-836, 2017.

GOUVEIA, G. M. M. M. **Análise energético-ambiental de fachadas com foco na reciclagem. Estudo de caso com painéis de alumínio composto “ACM” em Brasília**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p. 2012.

GUINÉE, B., GORRÉE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., KONING, A., et al. Handbook on life cycle assessment—operational guide to the ISO standards. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 2002.

GUINÉE, B., HEIJUNGS, R. A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. **Environ Toxicol Chem** 1995;14. p. 17–25.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J.B.; HUPPES, G. **Impact categories for natural resources and land use** : survey and analysis of existing and proposed methods in the context of environmental life cycle assessment. Editora: CML Leiden. Institute of Environmental Sciences. 38 p., 1997.

HERRMANN, I.; MOLTESEN, A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal Of Cleaner Production**, v. 86, p.163-169, 2015

HONG, T.; KIM, J.; KOO, C. LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. **Energy and Buildings**, v. 45, p.229-239, 2012.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**, Summary for Policymakers. 2014. 32 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION . **ISO 14025**: Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations -- Principles and procedures, Switzerland, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION . **ISO 14040**: Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework, Switzerland, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION . **ISO 14042**: Environmental Management –Life cycle impact assessment, Switzerland, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION . **ISO 14044**: Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines, Switzerland, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION . **ISO 20121**: Event Sustainability Management System, Switzerland, 2000.

KIM, J.; HONG, T.; KOO, C. Economic and Environmental Evaluation Model for Selecting the Optimum Design of Green Roof Systems in Elementary Schools. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p.8475-8483, 2012.

KOSAREO, L.; RIES, R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. **Building and Environment**, v. 42, n. 7, p.2606-2613, 2007.

LAMNATO, C.; CHEMISANA, D. Evaluation of photovoltaic-green and other roofing systems by means of ReCiPe and multiple life cycle-based environmental indicators.

Building and Environment, v. 93, p.376-384, 2015.

LAMNATO, C.; CHEMISANA, D. Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate. **Journal of Cleaner Production**, v. 72, p.57-75, 2014.

LIRA, J.; CALDAS, L.; SPOSTO, R. Estado da arte sobre Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) aplicada a Telhados Verdes. In: II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2016, João Pessoa. Anais do II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2016.

LIRA, J.; SPOSTO, R. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO₂A) assessment of roofing systems: conventional system and green roof. In: SBE16 BRAZIL & PORTUGAL, 2016, Vitória. **SUSTAINABLE URBAN COMMUNITIES TOWARDS A NEARLY ZERO IMPACT BUILT ENVIRONMENT**. Vitória: SBE, 2016. v. 3, p. 351 - 360.

LOBO, F. H. R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná**. 2010. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, UFPR, Curitiba, 2010.

LOPES, T. V. **Telhado verde, energia embutida e emissão de CO₂: uma análise comparativa a sistemas de cobertura convencionais**. Curitiba, 92 p., 2014. Monografia (Especialização) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LUCKETT, Kelly. **Green Roof Construction and maintenance**. Estados Unidos: McGraw-hill's GreenSource Series, 2009. 208 p.

MACIEL, A. C. **Energia Incorporada de Fachadas Ventiladas. Estudo de Caso para Edificação Habitacional em Brasília-DF**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146 p. 2013.

MENDES, N. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, USP, São Carlos, 2013.

Ministério do meio ambiente. <<http://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>>; acesso em 08/01/2017.

MYRANS, K. **Comparative energy and carbon assessment of three green technologies for a Toronto roof**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado) - University of Toronto. Toronto, 2009.

NABUT NETO, A. C. **Energia Incorporada e emissões de CO₂ de fachadas. Estudo de caso do *steel frame* para utilização em Brasília, DF**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p. 2011.

Observatório do Clima (2014). <<http://www.observatoriodoclima.eco.br/>>; Acesso em 05/01/2017.

PALACIO, C. D. U. **Análise térmica e energia incorporada de vedações para habitações de interesse social. Estudo de caso com utilização do *steel frame* no entorno do DF**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123 p. 2013.

PAULSEN, J.; SPOSTO, R. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. **Energy and Building**, v. 57, p. 95-102, 2013.

PEDROSO, G. M. **Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 226p, 2015.

PEREIRA, M. F. B. **Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso**. 2014. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PERI, G.; TRAVERSO, M.; FINKBEINER, M.; RIZZO, G. Embedding “substrate” in environmental assessment of green roofs life cycle: evidences from an application to the

whole chain in a Mediterranean site. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, n. 1, p.274-287, 2012.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Lei N° 16277**. São Paulo, 2015.

PREFEITURA DO RECIFE. **Lei N° 18.112**. Recife, 2015.

RINCÓN, L.; COMA, J.; PÉREZ, G.; CASTELL, A.; BOER, D.; CABEZA, L.

Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. **Building and Environment**, v. 74, p.22-30, 2014.

RIVELA, B.; CUERDA, I.; OLIVIERI, F.; BEDOYA, C.; NEILA, J. Life Cycle Assessment for ecodesign of ecological roof made with Intemper TF Ecological Water-Tank System.

Materiales de Construcción, v. 63, p.131-145, 16 fev. 2013.

SAADE, M., SILVA, M; GOMES, V., et al. A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. **Natureza on line**, v. 3, p. 109-116, 2014.

SAIZ, S.; KENNEDY, C.; BASS, B.; PRESSNALL, K. Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 13, p. 4312-4316, 2006.

SAVI, A. C. **Telhados verdes: uma análise da influência das espécies vegetais no seu desempenho na cidade de Curitiba**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Engenharia de Construção, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SAVI, A. C. **Telhados verdes: análise comparativa de custo com sistemas tradicionais de cobertura**. 2012. 128 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construções Sustentáveis II, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SEEG 2015: <<http://seeg.eco.br/2015/11/22/queda-no-desmatamento-nao-derruba-emissoes-de-gases-estufa-do-brasil/>>; Acesso em 18/02/2017.

SEEG 2016a: <<http://seeg.eco.br/contexto/>>; Acesso em 10/02/2017.

SEEG 2016b. Observatório do Clima. Análise das emissões de GEE Brasil (1970-2014) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris.

Disponível em: < <http://seeg.eco.br/wpcontent/uploads/2016/09/WIP-16-09-02-RelatoriosSEEG-Sintese.pdf>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2017.

SCHNEIDER, L.; BERGER, M.; FINKBEINER, M. Abiotic resource depletion in LCA— background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, v. 20, p.709-721. 2015.

SILVA, C.; GOMES, M.; SILVA, M. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 116, p.318-325. 2016.

SILVA, Janine. **Análise do Ciclo de Vida de tijolos prensados de escória de alto-forno**. 2005. 260 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, UFES, Vitória, 2005.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.

TAVARES, S.; LOPES, T.; SAVI, A; OLIVEIRA, E. Telhado verde, energia embutida e emissão de CO₂: análise comparativa a coberturas convencionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15, 2014, Maceió. Anais do XIV ENTAC. Maceió: ANTAC, 2014. P. 1-10.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energética de Edificações Residenciais Brasileiras**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TOLDERLUND, L. **Design guidelines and maintenance manual for green roofs in the Semi-Arid and Arid West**. Colorado: LEED AP, GRP, University of Colorado Denver, 2010. 59 p.

Velazquez, L. EUROPEAN AIRPORT GREENROOFS - A POTENTIAL MODEL FOR NORTH AMERICA. Publisher & Design Consultant. 2008. 29 p. Disponível em: <http://www.greenroofs.com/pdfs/exclusives-european%20_airport_greenroofs.pdf>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2017.

VOTORANTIM CIMENTOS. EPD – Environmental Product Declaration. Cements CP II E 40, CP III-40 RS and CP V-ARI.

WONG, J.; LAU, L. From the 'urban heat island' to the 'green island'? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong. **Habitat International**, v. 39, p.25-35, 2013.

YELLISHETTY, Mohan; MUDD, Gavin M.; RANJITH, P.g.. The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?. **Journal Of Cleaner Production**, v. 19, p.78-90. 2011.

APÊNDICE

APÊNDICE A: Processo de produção dos materiais do telhado verde.

Todos os materiais²⁰ possuem um conjunto de dados que representa um inventário de berço ao portão. Pode ser usada para caracterizar a situação da cadeia de suprimentos da respectiva mercadoria de forma representativa. A combinação com os processos unitários individuais que utilizam esta mercadoria permite a geração de ACVs (produto) específicas para o usuário.

OSB (berço ao portão)

OSB é feito de três camadas de vertentes. Estas cadeias são dispersas de tal modo que são escalonadas a 90° umas das outras nas três camadas. Umedecido com resina de cola, os fios são prensados a uma placa em uma prensa aplicando calor e pressão. Os fios são predominantemente compostos de madeira de pinho ou abeto e têm um comprimento de 10 a 15 cm e uma largura de aproximadamente 2 a 3 cm. Para a parte central, é usada a cola MDI (*Methylen diphenyl isocyanate*) e a cola MUPF (*Melamine-Urea-Phenol-Resin*) é usada para a camada superior.

Madeira maciça (berço ao portão)

Para a produção de madeira maciça de construção é necessário uma estrutura de madeira refinada. Isso coloca demandas no caráter de superfície. Abeto, pinheiro, pinho, larício e douglásia são aceitos e mostrados no conjunto de dados como madeira de construção sólida de madeira de coníferas.

O perfil ambiental contém os gastos de "berço ao portão". Baseia-se principalmente na pesquisa da literatura e na coleta direta de dados da indústria. O conjunto de dados do berço ao portão contém a absorção de CO₂ na floresta. Para uma avaliação completa do ciclo de vida, deve ser incluído um cenário correspondente de fim de vida.

Polietileno (berço ao portão)

A base para a produção de polietileno é o petróleo bruto. Existem alguns tipos de processo para a polimerização de etileno em polietileno. Polietileno é polimerizado a partir de etileno, que é extraído por *cracking* da nafta ou gasolina em um *steam-cracker*. O polietileno de alta densidade (PEAD) é produzido em um processo de baixa pressão que é classificado de acordo com a fase em que a reação ocorre no processo de solução, processo de suspensão e processo em fase gasosa. Devido à sua elevada parcela de mercado, o processo em fase gasosa num reator de leito fluidizado é escolhido como processo de referência para a produção de polietileno. O etileno gasoso entra no reator através de uma placa distribuidora que proporciona uma distribuição uniforme de gás e também deve impedir que o pó caia quando o fluxo de gás é parado. O leito fluidizado funciona mais ou menos como um reator de tanque de agitação contínuo no qual a transferência de massa proporciona a mistura de volta de material e calor em todo o reator. Há um up-flow no centro e down-flow nas paredes. A conversão por passagem é de aproximadamente 2% para PEAD. Um ciclone e/ou filtro impedem que partículas finas cheguem ao refrigerador e compressor de reciclagem. O polímero é removido através de uma válvula sequenciada para um ciclone em pó, a partir do qual os monômeros residuais são recuperados e recomprimidos. O compressor de reciclagem

²⁰ Todas as informações foram extraídas fielmente do software *GaBi*, tanto no TV quanto no TC.

principal circula o gás a um caudal elevado, mas com uma pequena subida de pressão. As misturas são misturas de consumo. A mistura alemã representa a principal estrutura de importação dos materiais plásticos concordantes.

Poliéster (berço ao portão)

Os poliois estão ao lado dos isocianatos, o grupo mais importante de materiais de partida poliuretano (PUR). A maioria dos poliois que são utilizados para a produção de PUR são poliois de poliéster. Os poliois de poliéster com grupos hidroxilo terminais são produzidos pela adição de éteres cíclicos, neste caso óxido de propileno (PO) e óxido de etileno (EO). Geralmente, as unidades EO e PO são estruturadas como blocos homo, produzidos por adição em lotes de EO e PO na molécula de partida, ou como blocos misturados por alimentação de uma mistura de óxido de etileno / óxido de propileno ao iniciador. A combinação PO-EO bloco misto é usual.

Seixo (berço ao portão)

A moagem de calcário (seixo) é feita num processo multipasso, utilizando moinhos de rolos.

Areia (berço ao portão)

O quartzo (sílica) é um dos minerais mais comuns na crosta continental da Terra. Pertence ao sistema de cristal hexagonal, e é composto de silício, (SiO_2). O quartzo tem uma densidade de 2,65 g/cm. A areia de sílica é extraída juntamente com caulim e feldspato usando escavadeiras de caçamba ou dragas de caçamba. O material é tratado num processo de múltiplos passos. O material é triturado num tamanho de partícula menor, a separação das impurezas ocorre utilizando métodos de separação como flutuação, separação magnética, tratamento químico (por exemplo, com ácido), peneiramento e lavagem.

APÊNDICE B: Processo de produção dos materiais do telhado convencional.

Todos os materiais possuem um conjunto de dados que representa um inventário de berço ao portão. Pode ser usada para caracterizar a situação da cadeia de suprimentos da respectiva mercadoria de forma representativa. A combinação com os processos unitários individuais que utilizam esta mercadoria permite a geração de ACVs (produto) específicas para o usuário.

Cimento (berço ao portão)

Os principais processos de produção de cimento consistem na extração de matérias-primas, produção de clínquer e moagem de cimento. A extração da matéria-prima principal da pedreira ocorre normalmente na área imediata das obras de cimento. O cimento Portland (CEM I) é composto principalmente de cimento de clínquer finamente moído e uma menor quantidade de materiais pulverulentos. Outros cimentos podem também incluir constituintes tais como areia de escória (CEM III), pozolana natural (CEM IV), cinzas volantes, queima de xisto betuminoso ou calcário. O agente mais importante é o cimento de alto-forno (CEM III). A coagulação é controlada com a ajuda de constituintes menores, como o sulfato de cálcio, para facilitar o seu processamento ótimo na produção de betão. O cimento de clínquer é composto por uma mistura de produtos primários, principalmente de óxido de cálcio, sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro. Calcário, giz e argila (ou sua mistura natural de margas de calcário) fornecem esses constituintes químicos. A mistura de matéria-prima é aquecida até aproximadamente 1450 °C num forno rotativo até à sinterização. Novas ligações são criadas a partir do material de origem, estas são conhecidas como as fases de clínquer. Estes são silicatos de cálcio específicos e aluminatos de cálcio que dão ao cimento a sua propriedade característica de endurecimento na presença de água. Os combustíveis secundários para a produção de cimento são modelados com uma "abordagem de corte", isto é, os materiais não têm carga ambiental.

Areia (berço ao portão)

O quartzo (sílica) é um dos minerais mais comuns na crosta continental da Terra. Pertence ao sistema de cristal hexagonal, e é composto de silício, (SiO_2). O quartzo tem uma densidade de 2,65 g/cm. A areia de sílica é extraída juntamente com caulim e feldspato usando escavadeiras de caçamba ou dragas de caçamba. O material é tratado num processo de múltiplos passos. O material é triturado num tamanho de partícula menor, a separação das impurezas ocorre utilizando métodos de separação como flutuação, separação magnética, tratamento químico (por exemplo, com ácido), peneiramento e lavagem.

Seixo (berço ao portão)

A moagem de calcário (seixo) é feita num processo multipasso, utilizando moinhos de rolos.

Aço (berço ao portão)

Este conjunto de dados inclui extração de matéria-prima (por exemplo, carvão, ferro, minério, etc.) e processamento, por exemplo, produção de coque, finos, alto-forno, forno básico do oxigênio, laminagem a quente. Os insumos incluídos no Inventário do Ciclo de

Vida referem-se a todos os insumos de matéria-prima, incluindo sucata de aço, energia, água e transporte. Os produtos incluem aço e outros coprodutos, emissões para o ar, água e terra.

Madeira maciça (berço ao portão)

Para a produção de madeira maciça de construção é necessário uma estrutura de madeira refinada. Isso coloca demandas no caráter de superfície. Abeto, pinheiro, pinho, larício e douglásia são aceitos e mostrados no conjunto de dados como madeira de construção sólida de madeira de coníferas.

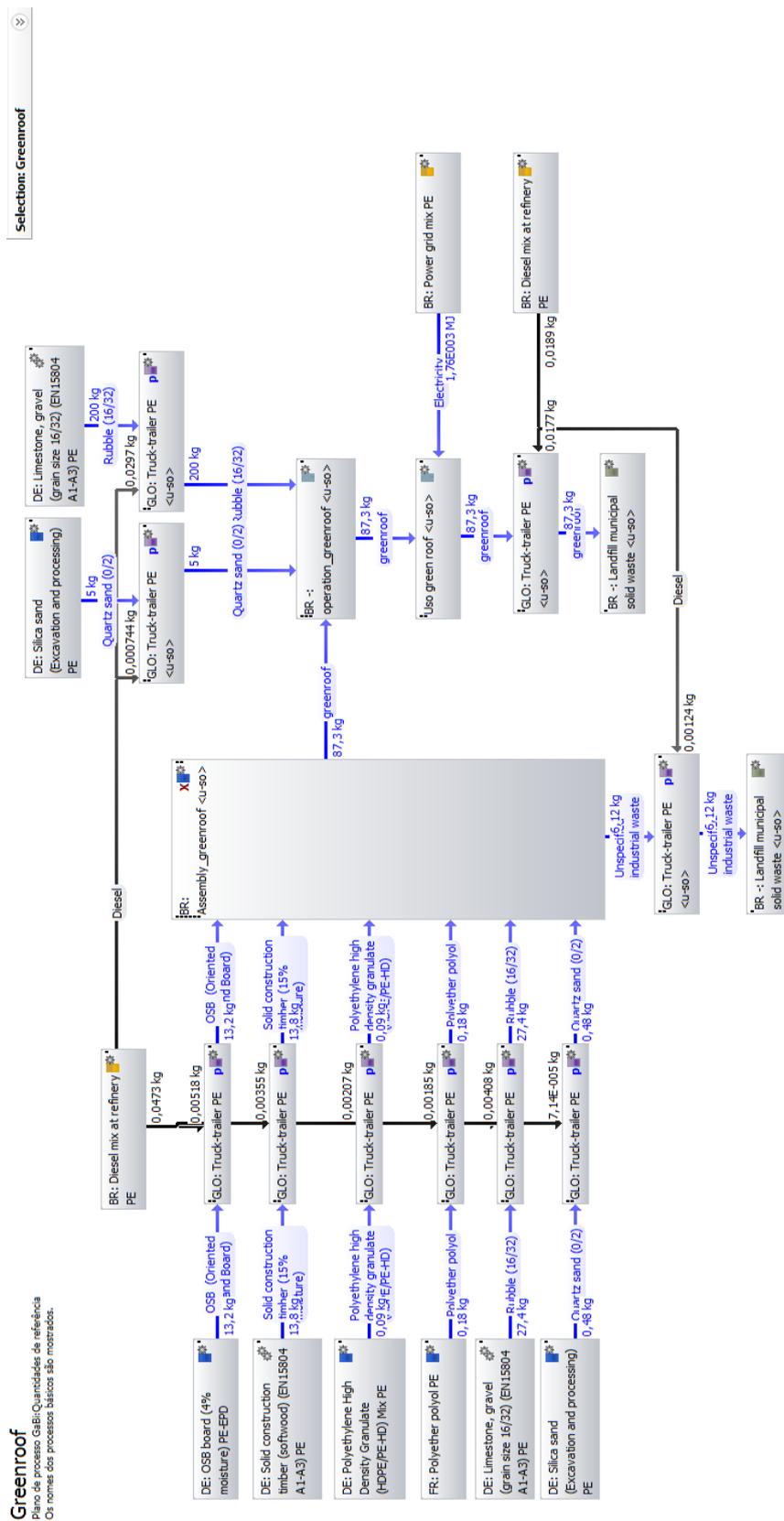
O perfil ambiental contém os gastos de "berço ao portão". Baseia-se principalmente na pesquisa da literatura e na coleta direta de dados da indústria. O conjunto de dados do berço ao portão contém a absorção de CO₂ na floresta. Para uma avaliação completa do ciclo de vida, deve ser incluído um cenário correspondente de fim de vida.

Telha cerâmica (berço ao portão)

A ACV das telhas é a fase do berço ao portão, ou seja, a produção de matérias-primas e materiais auxiliares, bem como a produção das telhas, incluindo a operação da usina. A principal matéria-prima é a argila. O limite do sistema é representado pelo produto pronto a ser enviado no portão de fábrica. Os transportes da fábrica para o local de construção não são considerados e devem ser incluídos de acordo com os limites do sistema.

ANEXO

ANEXO A: Fluxograma do sistema de Telhado Verde (TV) no software GaBi.



ANEXO B: Fluxograma do sistema de Telhado Convencional (TC) no software GaBi.

