

**POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE PAREDES DE
CONCRETO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

NÚBIA KARLA MENDES BRAGA

**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**

**POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE PAREDES DE
CONCRETO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

NÚBIA KARLA MENDES BRAGA

ORIENTADORA: ROSA MARIA SPOSTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**PUBLICAÇÃO: DM-13A/18
BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2018**

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

**POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE PAREDES DE
CONCRETO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA**

NÚBIA KARLA MENDES BRAGA

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)

Prof. Caio Frederico e Silva, Dr. (FAU-UnB)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, 5 DE JUNHO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

Braga, Núbia Karla Mendes
Potencial de aquecimento global de paredes de concreto a partir da avaliação do ciclo de vida / Núbia Karla Mendes Braga; orientadora Rosa Maria Sposto. -- Brasília, 2018.
136 p.

ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2018.
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.AC.V. 2. Parede de concreto. 3. Aquecimento global. 4. Habitação.
I. Sposto, Rosa, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRAGA, N. K. M. (2018). Potencial de aquecimento global de paredes de concreto a partir da avaliação do ciclo de vida. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação DM-13A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Núbia Karla Mendes Braga

TÍTULO: Potencial de aquecimento global de paredes de concreto a partir da avaliação do ciclo de vida

GRAU: Mestre ANO: 2018

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.

Núbia Karla Mendes Braga
QNH 11 casa 10 – Taguatinga
CEP: 72130-610, Brasília/DF - Brasil
e-mail: nubia.braga@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão maior a Deus, por não me deixar desistir e me dar forças através da intercessão de Nossa Senhora e de São José. Nos momentos em que pensei não conseguir chegar ao fim dessa etapa, Ele colocou anjos ao meu lado, e a eles sou extremamente grata: minha família e meus amigos. Foi por estarem comigo, suportarem minhas aflições e preocupações, partilharem os momentos de dificuldade, que consegui concluir meu mestrado.

Agradeço de forma especial àqueles que dividiram comigo as pressões das disciplinas, provas, seminários e artigos. Principalmente, meu muito obrigada ao Alexandre Negredo e à Júlia Lira. À Júlia eu devo muito do que esse trabalho significa, sem ela eu com certeza não teria conseguido, sempre esteve presente me ajudando com tudo que foi necessário, com todo o carinho e disponibilidade do mundo.

Agradeço também àqueles que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho, aos membros das bancas de qualificação e de defesa, ao Thiago Oliveira, pesquisador o IBICT, que auxiliou e esteve disponível para sanar as dúvidas que surgiram, e à minha orientadora, Rosa Sposto, que diante de todos os desafios que enfrentamos, teve uma enorme paciência e acreditou em mim, mesmo quando eu mesma não acreditava.

À CAPES também presto meus agradecimentos pela concessão da bolsa, e à UnB, pela oportunidade de vivenciar essa experiência.

RESUMO

POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE PAREDES DE CONCRETO A PARTIR DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Autora: Núbia Karla Mendes Braga

Orientadora: Rosa Maria Sposto

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, junho de 2018.

Devido à demanda por habitações de interesse social (HIS), surgiram sistemas e elementos construtivos com maior grau de industrialização, ou sistemas racionalizados. Entre os elementos de vedação vertical adotados no Brasil para HIS, têm-se, entre outros, as paredes de concreto. Verifica-se a necessidade da avaliação de seu desempenho técnico, bem como do seu desempenho ambiental, na busca da maior sustentabilidade na construção. Neste contexto, inclui-se a avaliação do ciclo de vida (ACV) de uma edificação com o uso deste tipo de parede, considerando desde a extração da matéria prima até a sua disposição final, quantificando os seus impactos, tais como o potencial de aquecimento global. Assim, tem-se como objetivo geral a avaliação do ciclo de vida de um sistema de vedação com função estrutural em concreto armado (paredes de concreto moldado *in loco* - PC) desde o berço até o túmulo (*cradle-to-grave*), verificando seu desempenho ambiental frente ao sistema de vedação convencional de blocos cerâmicos (com estrutura de pilares e vigas de concreto armado) - VC, para uma HIS. A metodologia foi baseada nos conceitos de ACV, e a avaliação de impacto foi realizada por meio de uma análise híbrida com dados secundários e por meio de simulação no *software* GaBi, versão educacional. Na fase de uso, o consumo energético para utilização de condicionamento artificial foi obtido por meio de simulações com o *software DesignBuilder 5.0*, do *EnergyPlus*, considerando os dados para a zona bioclimática 4, e o valor encontrado foi utilizado na conversão para a categoria de impacto potencial de aquecimento global. Os resultados apontam que a etapa de operação (EO) é a maior responsável pelo potencial de aquecimento global dos sistemas, seguida pela fase de pré-uso, principalmente na etapa de produção (EP). Concreto, bloco cerâmico e cimento são os materiais que apresentaram maior contribuição nessa etapa. As etapas de transporte e de desconstrução não apresentaram valores relevantes frente aos resultados para EP e EO. Em relação aos tipos de fôrmas utilizadas no sistema PC, a fôrma de alumínio mostrou-se com melhor desempenho ambiental que as de PVC e mistas, desde que considerado seu potencial de reutilização. Observou-se que os métodos utilizados na pesquisa, análise híbrida e GaBi (*midpoint*), apresentaram o mesmo padrão de resultados, apesar dos valores não serem idênticos. O sistema PC se mostrou mais vantajoso ambientalmente que o VC no que diz respeito à fase de pré-uso, mesmo com a utilização de uma espessura superior ao valor usual para que atenda aos requisitos de desempenho térmico, para o contexto climático de Brasília. Entretanto, quando se considera todas as fases do ciclo de vida, o sistema PC passa a ter o pior desempenho ambiental no que se refere às emissões de gases de efeito estufa, já que apresenta elevado consumo energético na EO, devido às propriedades de transmitância e capacidade térmica.

Palavras-chave: ACV, Potencial de aquecimento global, Paredes de concreto, Habitação de interesse social, Sustentabilidade.

ABSTRACT

GLOBAL WARMING POTENTIAL OF CONCRETE WALLS FROM THE LIFE CYCLE EVALUATION

Author: Núbia Karla Mendes Braga

Supervisor: Rosa Maria Sposto

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, June of 2018.

Due to the demand for this type of housing, systems and constructive elements have emerged with a higher degree of industrialization or streamlined systems. Among the vertical sealing elements adopted in Brazil for SH, concrete walls are among others. There is a need to evaluate its technical performance, as well as its environmental performance, in the search for greater sustainability in construction. In this context, life cycle assessment (LCA) of a building with the use of this type of wall is included, considering from the extraction of the raw material to its final disposal, quantifying its impacts, such as the heating potential global. Thus, the general objective is to assess the life cycle of a structural function fence system in reinforced concrete (in-situ molded concrete walls - CW) from the cradle to the grave, verifying its environmental performance compared to conventional ceramic block (with reinforced concrete beams and pillars) - CS, for an SH. The methodology was based on the concepts of LCA, and the impact assessment was performed through a hybrid analysis with secondary data and through simulation in the software GaBi, educational version. In the phase of use, the energy consumption for the use of artificial conditioning was obtained through simulations with the software DesignBuilder 5.0, of *EnergyPlus*, considering the data for the bioclimatic zone 4, and the value found was used in the conversion to the category of potential impact of global warming. The results showed that the operating stage (OS) was the main responsible for the global warming potential of the systems, followed by the pre-use phase, mainly in the production stage (PS). Concrete, ceramic block and cement are the materials that presented the greatest contribution in this stage. The transport and deconstruction stages did not present relevant values in relation to the results for PS and OS. In relation to the types of forms used in the PC system, the aluminum form was shown to have a better environmental performance than those of PVC and mixed, considering its potential for reuse. It was observed that the methods used in the research, hybrid analysis and GaBi (midpoint), presented the same type of results, although the values were not identical. The CW system proved to be more environmentally advantageous than the CS for the pre-use phase, even with the use of a thickness exceeding the usual value to meet the thermal performance requirements. However, when considering all phases of the life cycle, the CW system will have the worst environmental performance in terms of greenhouse gas emissions, since it has a high energy consumption in the OS due to the transmittance and thermal capacity.

Keywords: LCA, Global warming potential, Concrete walls, Social housing, Sustainability.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS.....	3
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.....	5
1 INTRODUÇÃO	7
1.1 JUSTIFICATIVA	10
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.3 HIPÓTESES	14
1.4 RESTRIÇÕES DA PESQUISA.....	14
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL.....	17
2.2 INICIATIVAS INTERNACIONAIS ACERCA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS... 21	
2.3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E ACVCO ₂ NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	23
2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	27
2.4.1 <i>Objetivo e escopo de uma ACV</i>	32
2.4.2 <i>Análise do inventário de uma ACV</i>	33
2.4.3 <i>Avaliação de impacto de uma ACV</i>	33
2.4.4 <i>Interpretação de uma ACV</i>	34
2.4.5 <i>Fases do ciclo de vida</i>	35
2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO	37
2.6 BANCOS DE DADOS E FERRAMENTAS DE APOIO À ACV	39
2.7 PROGRAMA BRASILEIRO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (PBACV)	41
2.8 GABI.....	42
2.9 VEDAÇÕES VERTICAIS EM PAREDE DE CONCRETO	43
2.10 ACV EM PAREDE DE CONCRETO	48
2.11 DESEMPENHO TÉRMICO E CONSUMO ENERGÉTICO NA FASE OPERACIONAL DE EDIFICAÇÕES.....	50
2.11.1 <i>DesignBuilder</i>	52

3 MÉTODO.....	53
3.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS E ESCOPO	54
3.1.1 <i>Caracterização da unidade habitacional.....</i>	55
3.1.2 <i>Fases da avaliação do ciclo de vida</i>	58
3.1.3 <i>Localização</i>	61
3.1.4 <i>Zona bioclimática.....</i>	61
3.1.5 <i>Unidade funcional.....</i>	61
3.1.6 <i>Fronteiras do sistema.....</i>	62
3.2 COMPOSIÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO	63
3.2.1 <i>Fase de pré-uso</i>	64
3.2.2 <i>Fase de uso.....</i>	67
3.2.3 <i>Fase de fim de vida.....</i>	68
3.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS	69
3.3.1 <i>Avaliação pela Análise híbrida</i>	70
3.3.2 <i>Avaliação pelo GaBi</i>	71
3.4 INTERPRETAÇÃO	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE HÍBRIDA	74
5.1.1 <i>Levantamento de materiais</i>	74
5.1.2 <i>Comparação entre os tipos de forma para sistema PC</i>	75
5.1.3 <i>Emissões de CO₂-eq na Etapa de Produção - EP</i>	78
5.1.4 <i>Levantamento de distâncias de transporte.....</i>	81
5.1.5 <i>Emissões de CO₂-eq na Etapa de Transporte inicial - ETi.....</i>	82
5.1.6 <i>Emissões de CO₂-eq na Etapa de Operação - EO: simulação energética no software DesingBuilder.....</i>	84
5.1.7 <i>Emissões de CO₂-eq na Etapa de Manutenção - EM.....</i>	85
5.1.8 <i>Emissões de CO₂-eq na Etapa de Desconstrução - ED</i>	86
5.1.9 <i>Emissões de CO₂-eq na Etapa de Transporte Final - ETf</i>	87
5.1.10 <i>Resultado final da Análise Híbrida.....</i>	87
5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO GABI.....	90
5.2.1 <i>Inventário do ciclo de vida.....</i>	90
5.2.2 <i>Resultado de potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq)</i>	94
5.3 COMPARATIVO ANÁLISE HÍBRIDA X GABI.....	98

5.4 CONSIDERAÇÕES RELEVANTES	100
6 CONCLUSÃO	101
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A: PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS ESCOLHIDOS NAS DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO.....	116
APÊNDICE B: PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS MATERIAIS NO GABI.....	118
APÊNDICE C: QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O SISTEMA PC.....	120
APÊNDICE D: QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O SISTEMA VC.....	121
APÊNDICE E: ETAPA DE TRANSPORTE INICIAL ETI - SISTEMA PC.....	122
APÊNDICE F: ETAPA DE TRANSPORTE INICIAL ETI - SISTEMA VC.....	123
APÊNDICE G: FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PAREDE DE CONCRETO (PC) COM FÔRMA DE ALUMÍNIO NO <i>SOFTWARE GABI</i>.....	124
APÊNDICE H: FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PAREDE DE CONCRETO (PC) COM FÔRMA DE PVC NO <i>SOFTWARE GABI</i>.....	125
APÊNDICE I: FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE PAREDE DE CONCRETO (PC) COM FÔRMA MISTA NO <i>SOFTWARE GABI</i>.	126
APÊNDICE J: FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO CONVENCIONAL (VC) NO <i>SOFTWARE GABI</i>.	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projeção da variação média da temperatura superficial da Terra de 1986 para 2005 e de 2081 para 2100.....	18
Figura 2: Fluxo ilustrativo de uma ACV.....	28
Figura 3: Estrutura de uma ACV.....	31
Figura 4: Esquema de inserção de armaduras.....	46
Figura 5: Fluxo de produção em paredes de concreto.....	47
Figura 6: Etapas da metodologia adotada.....	53
Figura 7: Detalhe e corte da vedação em parede de concreto.....	54
Figura 8: Detalhe e corte da vedação convencional.....	54
Figura 9: Perspectiva do projeto padrão adotado.....	55
Figura 10: Projeto de habitação de interesse social estudado.....	56
Figura 11: Fachadas da habitação. a) principal; b) posterior; c) lateral direita; d) lateral esquerda.....	57
Figura 12: Cortes da habitação. a) Sem a cobertura; b) Corte a 1,20 m de altura em planta baixa; c) Longitudinal; d) Transversal.....	57
Figura 13: Categorias de impacto analisadas.....	58
Figura 14: Fronteiras da ACV em relação às fases abordadas.....	59
Figura 15: Variáveis consideradas neste estudo.....	60
Figura 16: Localização hipotética da obra.....	61
Figura 17: Sistema de parede de concreto utilizado na pesquisa.....	65
Figura 18: Fluxo de <i>inputs</i> do sistema de parede de concreto.....	66
Figura 19: Fluxo de <i>inputs</i> do sistema de vedação convencional.....	66
Figura 20: Tela de exibição do <i>software GaBi</i>	72
Figura 21: Gráfico de comparação entre os tipos de fôrmas.....	77
Figura 22: Modelo da habitação simulada no <i>software</i>	84
Figura 23: Emissão de CO ₂ -eq (kg/m ²) total na etapa de operação - EO.....	85
Figura 24: Percentual (%) de potencial de aquecimento global por fase – Análise híbrida....	90
Figura 25: Percentual (%) de potencial de aquecimento global por fase – <i>GaBi</i>	98
Figura 26: Total de potencial de aquecimento global (kgCO ₂ -eq/m ²) por sistema – comparativo.....	99

Figura 27: Potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq/m²) na fase de pré-uso – comparativo.....99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Trabalhos desenvolvidos sobre ACV.....	12
Tabela 2: Descrição dos Gases de Efeito Estufa (GEE).....	19
Tabela 3: Conversão dos GEE em CO ₂ -eq (GWP).....	20
Tabela 4: Ranking dos maiores emissores de GEE.....	26
Tabela 5: Itens avaliados para cada sistema.....	58
Tabela 6: Nomenclaturas e siglas das etapas adotadas para a ACV.....	60
Tabela 7: Transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos sistemas VC e PC.....	63
Tabela 8: Dados para a obtenção de fatores de correção de volume (FCV).....	69
Tabela 9: Dados de emissões de GEE e consumo energético no setor de transportes no ano de 2016.....	71
Tabela 10: Dados de emissões de GEE e consumo de energia no ano de 2016.....	71
Tabela 11: Quantitativo de materiais por unidade funcional (m ² de parede) - Sistema PC.....	74
Tabela 12: Quantitativo de materiais por unidade funcional (m ² de parede) - Sistema VC.....	75
Tabela 13: Quantidade de material de formas de alumínio, PVC e mistas em função do número de utilizações.....	75
Tabela 14: Emissão de GEE dos três tipos de fôrmas considerando uma utilização.....	76
Tabela 15: Emissão de GEE dos três tipos de fôrmas considerando seus potenciais de reutilização.....	77
Tabela 16: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – PC (alumínio).....	78
Tabela 17: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – PC (PVC).....	79
Tabela 18: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – PC (mistas).....	79
Tabela 19: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – VC.....	80
Tabela 20: Distâncias de transporte na Etapa de Transporte Inicial (ETi) – Sistema PC.....	81
Tabela 21: Distâncias de transporte na Etapa de Transporte Inicial (ETi) – Sistema VC.....	82
Tabela 22: Emissão de GEE na Etapa de Transporte inicial (ETi) – PC.....	82
Tabela 23: Emissão de GEE na Etapa de Transporte inicial (ETi) – Fôrmas.....	83
Tabela 24: Emissão de GEE na Etapa de Transporte inicial (ETi) – VC.....	83
Tabela 25: Consumo energético (MJ) para condicionamento artificial e iluminação na EO durante a vida útil por unidade funcional.....	84
Tabela 26: Quantidade de materiais na EM para sistema VC.....	86
Tabela 27: Emissão de GEE referente ao processo produtivo para a EM.....	86

Tabela 28: Emissão de GEE referente ao transporte de materiais para a EM.....	86
Tabela 29: Emissão de GEE na Etapa de Desconstrução (ED).....	87
Tabela 30: Distâncias de transporte na Etapa de Transporte Final (ETf).....	87
Tabela 31: Emissão de GEE na Etapa de Transporte Final - ETi.....	87
Tabela 32: Resultado da análise híbrida – Sistema PC (alumínio).....	88
Tabela 33: Resultado da análise híbrida – Sistema PC (PVC).....	88
Tabela 34: Resultado da análise híbrida – Sistema PC (mistas).....	89
Tabela 35: Resultado da análise híbrida – Sistema VC.....	89
Tabela 36: Etapa de produção (EP) do sistema PC com fôrma de alumínio.....	91
Tabela 37: Etapa de produção (EP) do sistema PC com fôrma de PVC.....	91
Tabela 38: Etapa de produção (EP) do sistema PC com fôrma mista.....	91
Tabela 39: Etapa de produção (EP) do sistema VC.....	92
Tabela 40: Etapa operacional (EO) do sistema PC.....	92
Tabela 41: Etapa operacional (EO) do sistema VC.....	92
Tabela 42: Etapa de manutenção (EM) do sistema VC.....	93
Tabela 43: Etapa de desconstrução (ED) do sistema PC.....	93
Tabela 44: Etapa de desconstrução (ED) do sistema VC.....	93
Tabela 45: Resultado da ACV no GaBi – Sistema PC (alumínio).....	94
Tabela 46: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema PC (alumínio).....	94
Tabela 47: Resultado da ACV no GaBi – Sistema PC (PVC).....	95
Tabela 48: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema PC (PVC).....	95
Tabela 49: Resultado da ACV no GaBi – Sistema PC (mistas).....	95
Tabela 50: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema PC (mista).....	96
Tabela 51: Resultado da ACV no GaBi – Sistema VC.....	96
Tabela 52: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema VC.....	97
Tabela 53: Resultado da etapa de manutenção (EM) no GaBi – Sistema VC.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida
ACVCO₂ - Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂
ACVCO₂-eq - Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂-eq
ACVE - Avaliação do Ciclo de Vida Energético
AC - Condicionamento artificial
BNH - Banco Nacional da Habitação
CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CFCs - Clorofluorcarbonos
CO₂-eq - Equivalente de dióxido de carbono
COHAB - Companhias de Habitação Popular
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP - Conferência das Partes sobre Mudança do Clima
CT - Capacidade térmica
DAP - Declaração Ambiental de Produto
DATec - Documento de Avaliação Técnica
ED - Etapa de Desconstrução
EI - Energia incorporada
EM - Etapa de Manutenção
EO - Etapa de Operação
EP - Etapa de Produção
EPA - *Environmental Protection Agency*
EPD - *Environmental Product Declaration*
ETi - Etapa de Transporte Inicial
ETf - Etapa de Transporte Final
FCO₂-eq - Fatores de emissão de CO₂-eq
FCV - Fatores de correção de volume
FR - Fator de reposição
GEE - Gases de efeito estufa
GWP - *Global Warming Potential*
HIS - Habitações de Interesse Social
IA - Iluminação artificial

IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

ICV - Inventário do Ciclo de Vida

ILCD - Sistema Internacional de Referência de Dados de Ciclo de Vida de Produtos e Processos

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC - Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas

LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

LSF - *Light steel frame*

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia

MRI - *Midwest Reasearch Institute*

PBACV - Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida

PBQP-h - Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat

PC - Parede de Concreto

PECC - Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

PMCMV - Programa “Minha Casa, Minha Vida”

PNAD - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

PNMC - Política Nacional sobre Mudança do Clima

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PSQ - Programas Setoriais de Qualidade

SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SINAT - Sistema Nacional de Avaliações Técnicas

SVV - Sistemas de Vedação Vertical

SVVIE - Sistemas de Vedação Interna e Externa

UNFCCC - Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*

U - Transmitância térmica

UF - Unidade Funcional

UNB - Universidade de Brasília

USP - Universidade de São Paulo

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

VC - Vedação Convencional

ZB - Zona Bioclimática

1 INTRODUÇÃO

Diante do déficit habitacional brasileiro enfrentado nos últimos anos, houve um grande investimento em programas de construção de habitações de interesse social (HIS), como o programa “Minha Casa, Minha Vida” (PMCMV). Por meio deste programa, o governo federal subsidiou a construção de habitações populares em várias regiões do país.

Devido à demanda por essas habitações, em geral projetadas para grandes conjuntos habitacionais, surgiu, nos últimos anos, a necessidade de se utilizar sistemas com maior grau de industrialização ou sistemas racionalizados, a fim de elevar a produtividade e reduzir os custos. Justamente devido à larga escala de construção necessária para a minimização do déficit, a adoção de sistemas industrializados e racionalizados torna-se uma opção com maior viabilidade.

Entre os sistemas construtivos adotados no Brasil para HIS, além dos convencionais constituídos por estrutura de concreto armado e vedação de blocos cerâmicos, têm-se os sistemas de alvenaria estrutural de blocos de concreto ou cerâmicos e as paredes estruturais de concreto, porém, muitos outros sistemas inovadores que vêm sendo utilizados ainda não possuem norma técnica. O sistema construtivo em paredes de concreto torna-se então uma alternativa interessante, já que possui norma.

A Caixa Econômica Federal apresenta requisitos e condições mínimas de desempenho estrutural, segurança ao fogo, revestimentos, durabilidade entre outros necessários para os sistemas empregados no âmbito do PMCMV. Entretanto, não são apresentados requisitos mínimos de sustentabilidade ambiental como energia incorporada dos materiais e emissões de CO₂ que permitam uma avaliação do desempenho ambiental dos sistemas.

Na última década, foi criado um programa com o intuito de avaliar o desempenho destes sistemas, denominado por Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT), gerenciado pelo Ministério das Cidades, no âmbito do Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat – PBQP-h. O primeiro sistema avaliado a partir da implantação do SINAT em 2007 foi o de paredes de concreto moldado *in loco*, que teve sua norma publicada em 2012, a ABNT NBR 16055: 2012. O sistema de paredes de concreto já havia sido empregado em várias localidades, sendo que no Distrito Federal, podem se apontadas as habitações implantadas na Região Administrativa de São Sebastião, com cerca de 8000 unidades entre

casas e apartamentos, e na Região Administrativa do Riacho Fundo, com aproximadamente 6000 unidades.

Mesmo este sistema construtivo tendo sido aprovado pelo SINAT, que tem como critérios o desempenho estrutural, de habitabilidade e de sustentabilidade, de acordo com a norma de desempenho, a ABNT NBR 15575: 2013, não há informações consistentes a respeito dos aspectos de desempenho ambiental nas etapas do ciclo de vida. Vale salientar que essas informações são relevantes principalmente em se tratando de paredes, que no contexto de habitações térreas, são os elementos que mais consomem recursos.

Em relação à sustentabilidade ambiental, a produção de edificações tais como as HIS acarretam impactos ambientais negativos, devido ao grande consumo de recursos, à geração de resíduos e às emissões nocivas para o meio ambiente. Assim, pergunta-se se o sistema de parede de concreto tem desempenho superior em relação à sustentabilidade ambiental frente ao sistema convencional, já que nos dias atuais esta preocupação tem estado presente no momento da escolha da alternativa tecnológica de sistemas construtivos.

O setor de construção contribui para a mudança climática global em seu ciclo de vida. Por exemplo, o setor responde por mais de 40% do consumo total de energia primária (TAKANO *et al.*, 2015).

Giesekam *et al.* (2014) salientam que os edifícios são responsáveis pela maior parcela de consumo de energia em todo o mundo e são responsáveis por cerca de um terço das emissões globais de carbono. Mas esses impactos representam também oportunidades de melhoria, e as principais agências internacionais consideram os edifícios como protagonistas das ações de mitigação de carbono (AGUSTÍ-JUAN *et al.*, 2017; IPCC, 2014).

A extração e fabricação de matérias-primas geram uma quantidade significativa de emissões de GEE. A indústria de fabricação do cimento, por exemplo, consome elevadas quantidades de energia e possui grande participação nas emissões de carbono, representando 5% das emissões globais de CO₂ produzidas pelo homem, devido principalmente aos processos de queima e calcinação (WU *et al.*, 2014; SHEN, 2015).

O transporte de matérias-primas também é apresenta alto consumo energético, especialmente para países que dependem fortemente da importação de matérias-primas. O processo de construção nem sempre é eficaz e pode gerar emissões de carbono desnecessárias. Como uma das maiores fontes de emissões de GEE, o edifício e a indústria da construção enfrentam uma

pressão cada vez maior para reduzir suas emissões de GEE no ciclo de vida. (WU *et al.*, 2014).

O consumo de energia acarreta impactos negativos ao meio ambiente, principalmente porque grande parte da energia é gerada por meio de combustíveis fósseis, resultando em grande quantidade de emissões de dióxido de carbono (CO₂), por exemplo. Portanto, uma redução do consumo de energia na produção de habitações é uma meta importante para uma determinada região (PAULSEN; SPOSTO, 2013); mesmo no Brasil, onde se tem uma matriz energética mais limpa, as fontes renováveis representam 75,5% da oferta interna de eletricidade no Brasil (BRASIL, 2016).

Os agregados utilizados nas estruturas, bem como nos assentamentos e revestimentos, também geram impactos principalmente na sua extração, e ainda durante seu transporte, por vezes a longas distâncias, acarretando emissões de CO₂ devido ao diesel empregado no transporte rodoviário.

Assim, tem-se na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) uma forma de contabilizar os impactos ambientais, sendo importante realizar a ACV da edificação, considerando desde a extração da matéria prima até o reuso ou reciclagem dos materiais, ou mesmo dos resíduos que tem potencial de reciclagem ou a disposição final destes em aterros controlados, momento no qual é cessada a sua vida útil e não mais existe a possibilidade de reuso ou reciclagem. Este ciclo é denominado por berço ao túmulo.

O desenvolvimento de um estudo de ACV é um processo de alta complexidade, visto que engloba um grande número de variáveis e os diversos impactos associados aos processos produtivos envolvidos. Desta forma, muitos trabalhos tem buscado dividir o estudo em partes, que são versões simplificadas ou recortes, onde são levantados e analisados alguns tipos de impactos, como energia consumida, emissão de CO₂, consumo de água e etc, ou seja, apenas uma categoria de impacto é analisada. Segundo Caldas *et al.* (2015), essa divisão é favorável para a obtenção de um estudo mais detalhado do impacto escolhido; Chau, Leung e Ng (2015) também afirmam que esse foco dado à ACV facilita na busca de dados e na interpretação dos resultados.

Nesse sentido, tem-se a Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂-eq (ACVCO₂-eq), no qual são consideradas as principais saídas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de um material, componente, sistema ou edificação ao longo das diferentes fases do seu ciclo de

vida, constituindo um meio para quantificação do impacto decorrente das emissões de GEE. O impacto referente às emissões desses gases é chamado de potencial de aquecimento global.

O equivalente de dióxido de carbono (CO₂-eq) é uma unidade comum que representa todos os gases de efeito estufa de acordo com seu potencial de aquecimento global. Esses gases são convertidos para um mesmo parâmetro, cuja referência é o dióxido de carbono (CO₂), de acordo com a agressividade de seu impacto ao meio ambiente.

1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme aponta Lira (2017), há uma tendência dos profissionais da construção civil e demais agentes dessa cadeia produtiva em buscar produtos inovadores e processos mais sustentáveis devido à preocupação cada vez mais evidente com o esgotamento de recursos naturais, a necessidade de aumento da eficiência energética e a minimização dos impactos ambientais gerados pelas edificações.

Já existem estudos referentes à energia incorporada de habitações, porém o assunto ainda não está totalmente consolidado, havendo a necessidade de desenvolver mais pesquisas nesta área com foco em HIS, uso de energia e emissões em todas as fases do ciclo de vida.

Em relação às emissões de GEE, são poucos os trabalhos que avaliam esse impacto ao longo do ciclo de vida de habitações no Brasil, já que existem muitas dificuldades devido à grande quantidade de variáveis e a deficiência em dados de inventário nacionais. Considerando a necessidade de investimentos para o PMCMV, e a possível contribuição de emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa na sua produção, é importante analisar os impactos ambientais a fim de se obter uma visão acerca do desempenho no aspecto da sustentabilidade ambiental dos sistemas construtivos existentes, que leve à disponibilização de informações para uma melhoria nas tomadas de decisão, no que tange ao planejamento estratégico e especificação de sistemas construtivos e materiais.

Segundo Caldas (2016), a escolha de materiais, componentes e sistemas para a produção de habitações deve basear-se em critérios de sustentabilidade ambiental, tais como: durabilidade e facilidade de desconstrução, não toxicidade, baixo consumo de energia e baixo percentual de emissões gasosas, líquidas e sólidas.

É necessário que haja uma conscientização dos profissionais da construção civil a respeito da gestão de energia e sua emissão equivalente de CO₂, pois as questões relacionadas ao meio ambiente estão cada vez mais presentes. A pressão social e governamental por menores impactos já resulta em normas e legislações com rigor cada vez mais elevado, bem como tratados internacionais sobre o assunto (LOBO, 2010).

Ainda segundo o mesmo autor, as exigências atuais refletem a tendência do mercado a investir numa minimização de impactos, dessa forma, este panorama é uma questão de sobrevivência empresarial.

O desenvolvimento deste estudo se enquadra na linha de pesquisa "Gestão e Sustentabilidade na Construção Civil" do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília (UnB).

Neste contexto, foram desenvolvidos diversos trabalhos sobre ACV, como é apresentado na Tabela 1, com destaque para avaliação de ciclo de vida energético (ACVE) e de emissões de CO₂, (ACVCO₂), a maioria deles em sistemas de vedação vertical, tais como *light steel frame* (LSF), vedações convencionais de bloco de concreto e cerâmico, paredes de concreto, alumínio composto e fachadas ventiladas: Nabut Neto (2011), Gouveia (2012), Andrade (2013), Maciel (2013), Palácio (2013), Pedroso (2015), Caldas (2016). Em ACVE de sistemas de coberturas pode ser citada Caldeira (2016) e no estudo de depleção abiótica e potencial de aquecimento global de telhados verdes pode ser citado o trabalho desenvolvido por Lira (2017).

A maioria dos trabalhos abordou as fases de pré-uso (extração, fabricação e transporte de materiais), uso e manutenção; três trabalhos abordaram a fase de desconstrução. Todos os trabalhos abordaram a ACVE, exceto o de Caldas (2016) e Lira (2017), que abordaram CO₂ e CO₂-eq e depleção abiótica, respectivamente.

Tabela 1: Trabalhos desenvolvidos sobre ACV.

Autor	Descrição
Nabut Neto (2011)	ACVE e ACVCO ₂ na etapa de pré-uso, comparando um sistema de fachada convencional com o LSF.
Gouveia (2012)	Energia incorporada e emissões de CO ₂ na fase de pré-uso em fachadas com painéis de alumínio composto (ACM).
Andrade (2013)	Propôs uma ferramenta para avaliar a facilidade de desconstrução, denominada de “Matriz de Desconstrução”, baseada no consumo de energia necessário para o processo de desconstrução de galpões de concreto armado pré-fabricados.
Palácio (2013)	ACVE para o sistema de LSF, fazendo uma relação com o desempenho térmico para diferentes configurações do sistema, variando isolantes térmicos e acabamentos internos.
Maciel (2013)	ACVE nas fases de pré-uso e uso de uma edificação habitacional multifamiliar para três tipos de fachadas ventiladas. Foi analisada a energia consumida na etapa operacional, relacionada ao conforto térmico dos usuários, e a energia de manutenção dos materiais e componentes.
Pedroso (2015)	ACVE para quatro sistemas construtivos, sendo eles parede de concreto moldado <i>in loco</i> , alvenaria estrutural de blocos de concreto, sistema convencional com blocos cerâmicos e LSF, para todas as etapas do ciclo de vida. O foco do trabalho foi o processo de desconstrução dos sistemas, a partir de um programa experimental para o levantamento de energia na desconstrução. O autor desenvolveu um projeto habitacional padrão que vem sendo utilizado para outros estudos de ACV no âmbito do PECC.
Caldas (2016)	ACVE e emissões de CO ₂ do berço ao túmulo de uma habitação de interesse social (HIS) para a realidade de Brasília – DF, comparando o sistema de LSF com o convencional, e considerando o desempenho térmico.
Caldeira (2016)	Comparou o consumo energético da telha termoacústica com núcleo de EPS com o da telha cerâmica tipo Plan por meio de ACVE nas fases de pré-uso e uso (operação e manutenção).
Lira (2017)	Depleção abiótica (uso de recursos minerais e fósseis) e potencial de aquecimento global (emissões de CO ₂ -eq) de um telhado verde, em todas as fases do ciclo de vida, comparando com um telhado convencional para uma habitação em Brasília. Também foi quantificado o uso de condicionamento artificial na etapa de operação, observando-se a relação da transmitância térmica do sistema com a necessidade da utilização desses equipamentos.

É importante observar que o critério de atendimento ao desempenho térmico, nos trabalhos que avaliaram a fase de uso, varia de acordo com a localidade; os trabalhos mencionados consideraram estudo de caso da zona bioclimática 4, referente a Brasília; desta forma, a unidade funcional dos estudos foi estabelecida com base na transmitância térmica e na capacidade térmica exigidos pela ABNT NBR 15575: 2013 para esta zona.

Em relação ao sistema construtivo de paredes de concreto, aponta-se a ACVE realizada por Pedroso (2015), onde se observou que o uso de fôrmas de alumínio em geral empregadas

neste sistema é um dos principais responsáveis pela energia incorporada na fase de pré-uso, porém, na medida em que se considera o número de reutilizações possíveis, esse valor torna-se menos representativo. Em relação à fase de uso, verificou-se que manutenção das vedações responde por apenas 10 a 15% da energia incorporada durante os 50 anos de vida útil.

Outros trabalhos de ACVE em paredes de concreto já foram realizados no âmbito do PECC, entre os quais são citados Campos e Paiva (2013) e Castro (2014). Neste trabalho está sendo abordado o aquecimento global, em termos de GEE, tais como o CO₂ e o CO₂-eq, dada a sua importância. Os GEE têm sido palco de inúmeras discussões e acordos internacionais, tais como ocorreram nas Conferências das Partes sobre Mudança do Clima, que teve sua 22^a edição em 2016 (COP-22), conforme citado no item 2.2. Essa questão justifica o presente trabalho, já que essas discussões orientam a formulação de políticas nacionais que limitam as emissões de GEE, e tais políticas incluem, dentre vários outros setores, o da construção civil.

A metodologia proposta permite análises detalhadas das emissões de GEE nas fases do ciclo de vida, materiais de construção empregados e características térmicas dos sistemas avaliados, colaborando na construção da base de dados dos sistemas construtivos empregados nas HIS. Apesar do sistema de paredes de concreto já ter sido estudado por outros autores, não foi realizada a abordagem de avaliação do potencial de aquecimento global, no que se refere às emissões de gases de efeito estufa, tampouco uma avaliação do desempenho ambiental dos tipos de sistema de fôrmas, item fundamental para o elemento de vedação em questão.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação do ciclo de vida de um sistema de vedação com função estrutural em concreto armado (paredes de concreto moldado *in loco*) desde o berço até o túmulo (*cradle-to-grave*), verificando seu desempenho ambiental frente ao sistema de vedação convencional de blocos cerâmicos (com estrutura de pilares e vigas de concreto armado) para uma habitação de interesse social em Brasília, DF.

Como objetivos específicos têm-se:

- (a) Avaliar a contribuição de cada fase do ciclo de vida (pré-uso, uso e fim de vida) relacionada ao potencial de aquecimento global de cada sistema estudado, identificando a fase e/ou etapa com maior valor de potencial de aquecimento global;

- (b) Quantificar e avaliar se a energia gasta no condicionamento ambiental, para atender a faixa de conforto térmico estabelecida para os usuários, impacta na emissão de gases de efeito estufa (GEE) na etapa operacional da edificação;
- (c) Avaliar qual dentre os três tipos de fôrmas disponíveis para o sistema de parede de concreto (de alumínio, plástica e metálica com compensado plastificado) apresenta melhor desempenho ambiental no que tange a emissão de GEE, levando em consideração o fator reutilização de cada uma.
- (d) Comparar os resultados da avaliação do ciclo de vida obtidos por meio da simulação no *software* GaBi e por meio do uso de dados secundários na Análise Híbrida.

1.3 HIPÓTESES

O presente trabalho foi desenvolvido a fim de verificar a validade das seguintes hipóteses:

- (a) Uma habitação de interesse social (HIS) unifamiliar, com vedações verticais em parede de concreto, por ser constituído em grande parte por cimento, apresentará maiores valores de emissões de GEE que uma edificação de vedações verticais convencional de blocos cerâmicos e argamassa.
- (b) Diferentes desempenhos térmicos dos sistemas de vedação vertical impactam nas emissões de GEE da etapa operacional do ciclo de vida de uma habitação para a realidade climática de Brasília - DF.

1.4 RESTRIÇÕES DA PESQUISA

Neste trabalho, foi considerado apenas o impacto referente ao potencial de aquecimento global, no que se refere aos gases de efeito estufa. Os demais impactos ao meio ambiente não foram abordados.

Segundo a ABNT NBR 15220: 2005, o Brasil pode ser dividido em oito zonas bioclimáticas, às quais são atribuídas características e diretrizes construtivas específicas. Dessa forma, devido às características climáticas de cada região, um sistema construtivo pode apresentar

desempenhos diferentes em cada situação, sendo necessário avaliar a fase de uso. Neste trabalho, considera-se apenas o contexto climático de Brasília, referente à zona bioclimática 4.

Considerou-se somente o sistema de vedação vertical, sendo os demais sistemas, como cobertura, fundação e instalações, mantidos constantes para ambas as tipologias construtivas avaliadas neste estudo. O sistema de revestimento foi considerado com algumas ressalvas, de modo que se admite a superfície acabada, ou seja, apta para receber pintura. Assim, no sistema de parede de concreto é definido que não há necessidade de regularização para recebimento de pintura, e no sistema de vedação convencional, será necessária a aplicação de chapisco e reboco paulista, que, portanto, serão quantificados.

Devido à indisponibilidade de dados para os variados tipos de tintas existentes no mercado, foi considerado que o mesmo tipo de tinta foi aplicado em ambos os sistemas, e, portanto, este item foi desconsiderado. Foram consideradas todas as paredes com a mesma espessura.

Na etapa de operação, foi desconsiderado o uso de eletrodomésticos, visto que esta é uma variável que independe da tipologia construtiva. A diferença, portanto, nesta etapa, se dá no uso do aparelho de condicionamento artificial, que sofre variação devido ao desempenho térmico distinto de cada um dos sistemas construtivos.

A versão do *software* GaBi utilizado em parte da metodologia foi a educacional, que possui limitações quanto a abrangência do seu banco de dados disponibilizado.

Os fatores de emissão de CO₂-eq para a análise híbrida foram obtidos de dados da literatura e de Declarações Ambientais de Produtos (DAP), buscando-se encontrar processos e características que se assemelhem aos brasileiros, não necessariamente idênticos.

Não foi considerado o transporte de operários, nem o transporte de materiais dentro do próprio canteiro de obras. O gasto energético referente à etapa de execução não foi contabilizado.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto da dissertação está dividido em cinco capítulos. No primeiro é apresentado o contexto geral no qual a pesquisa se insere, tema, justificativa, objetivos gerais e específicos, hipóteses consideradas e restrições.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica, dividida em: conceitos inerentes ao potencial de aquecimento global, contexto acerca do histórico ambiental no Brasil e no mundo, conceitos sobre desenvolvimento sustentável e assuntos associados à sustentabilidade, e conceitos sobre Avaliação do Ciclo de Vida e métodos de avaliação de impacto existentes. Também é abordado o tema de vedações verticais, com breve revisão do sistema de paredes de concreto, questões da norma de desempenho, no que tange principalmente ao desempenho térmico e suas influências no desempenho ambiental do sistema. E por fim, um breve contexto do uso de ACV em paredes de concreto e uma explanação sobre os *softwares* aplicados nesta pesquisa.

O terceiro capítulo trata da metodologia definida para a pesquisa, com os detalhes para os sistemas construtivos analisados e para cada fase do ciclo de vida, baseados nas normas pertinentes a ACV.

No quarto capítulo, apresentam-se os resultados analisados na categoria de impacto potencial de aquecimento global, e a discussão dos mesmos.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas por meio da ACV realizada e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados os assuntos relativos ao tema proposto para a pesquisa, de modo a compreender melhor o cenário no qual a mesma se insere. Para tanto, é apresentada uma revisão da literatura, dividida em: conceitos inerentes ao potencial de aquecimento global, um contexto acerca do histórico ambiental no Brasil e no mundo, conceitos sobre desenvolvimento sustentável e assuntos associados à sustentabilidade, os conceitos sobre Avaliação do Ciclo de Vida e métodos de avaliação de impacto existentes. Também é abordado o tema de vedações verticais, explicitando uma revisão sobre o sistema de paredes de concreto. Uma breve abordagem sobre a norma de desempenho, no que tange principalmente ao desempenho térmico e suas influências no desempenho ambiental do sistema. E por fim, um breve contexto do uso de ACV em paredes de concreto e uma explanação sobre os *softwares* aplicados nesta pesquisa.

2.1 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

A principal causa para o aquecimento global é o acúmulo de gases responsáveis pelo efeito estufa, sendo dióxido de carbono (CO₂) o mais comumente associado a esse fenômeno. A emissão desses efluentes gasosos é consequência da geração e uso de energia, no que diz respeito, principalmente, à queima de combustíveis fósseis para geração de energia.

O efeito estufa é um fenômeno natural para a manutenção da temperatura terrestre, no entanto, nas últimas décadas, tem sido intensificado devido às atividades humanas. Com isso, esse fenômeno passou a provocar consequências climáticas capazes de promover impactos de grande magnitude, como o aumento da temperatura média global do ar e dos oceanos, o derretimento generalizado da neve e do gelo e a elevação do nível do mar (BRASIL, 2012). A emissão de gases de efeito estufa (GEE) ocorre nos diversos setores da economia, e seu impacto sobre as mudanças climáticas interferem em sistemas naturais e humanos em todos os continentes e oceanos (IPCC, 2014).

A fim de ilustrar a gravidade do efeito do aquecimento global, na Figura 1 é apresentado um esquema onde pode ser visualizada a variação média da temperatura superficial terrestre definida com base nas projeções médias de diversos modelos calculados para 2081-2100 (lado direito) em relação a 1986-2005 (lado esquerdo).

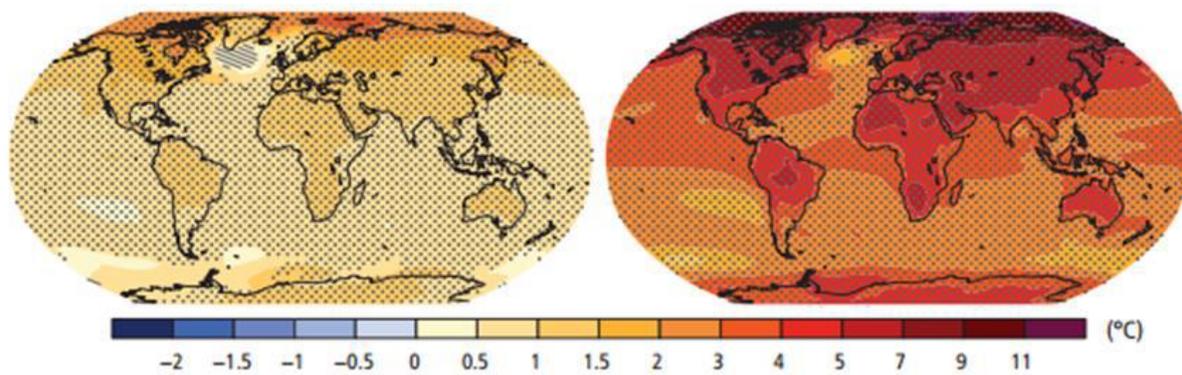


Figura 1: Projeção da variação média da temperatura superficial da Terra de 1986 para 2005 e de 2081 para 2100.

Fonte: IPCC, 2014.

A emissão de GEE no contexto da construção civil está relacionada à poluição ambiental, especificamente ligada à poluição atmosférica (NABUT NETO, 2011). Um poluente atmosférico, conforme considera a resolução n° 03 de 28/06/1990 do CONAMA, é qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que torne ou possa tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danosos aos materiais, à fauna e à flora, ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Segundo Ferrández-García, Ibáñez-Forés e Bovea (2016), dentro do contexto da ACV, os indicadores mais utilizados para mensurar possíveis danos ambientais são o potencial de aquecimento global e o consumo de energia. O potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*) é um tipo de categoria de impacto ambiental medido pelas emissões de CO₂-eq, que representa os gases com capacidade de causar o efeito estufa, e possuem, por este motivo, potencial para causar o aquecimento global.

Conforme estudos de Ortiz, Castells e Sonnemann (2009), o potencial de aquecimento global é o maior desafio ambiental enfrentado pelo ambiente construído, devido ao período significativo de ocupação que ocorre durante a vida útil, com uso de equipamentos de aquecimento, ventilação e resfriamento do ar. Assim, mesmo optando por insumos e tecnologias construtivas que mitiguem o impacto ambiental na construção civil, ainda é necessário promover melhorias no que diz respeito às fontes de energia, bem como de soluções arquitetônicas que minimizem a necessidade desses aparelhos.

Os GEE existentes na atmosfera podem ser de origem natural ou antrópica. Eles absorvem e emitem radiação em comprimentos de onda específicos dentro do espectro da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra, da atmosfera e das nuvens. Essas propriedades de absorção e emissão de radiação provocam o efeito estufa, que mantém a atmosfera aquecida (COSTA, 2012). Esses gases distinguem-se por serem acumulativos e irreversíveis, permanecendo dentro da atmosfera por séculos e sendo capazes de intensificar os danos provocados pelo efeito estufa (CARDOSO, 2015).

No Protocolo de Kyoto foram apontados seis tipos diferentes de gases de efeito estufa, sendo apresentados valores de emissão equivalentes de CO₂ para os gases de efeito estufa individuais. As emissões de carbono do ciclo de vida consideram todas as saídas de emissão de carbono equivalente de um edifício em diferentes fases do seu ciclo de vida (CHAU, LEUNG E NG, 2015).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2012), tem-se como gases de efeito estufa para o Protocolo de Kyoto, além do dióxido de carbono (CO₂), o gás metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), o hexafluoreto de enxofre (SF₆), os hidrofluorcarbonos e os perfluorcarbonos. A Tabela 2 apresenta uma breve descrição de cada um deles:

Tabela 2: Descrição dos Gases de Efeito Estufa (GEE).

GEE	Descrição
Dióxido de carbono (CO ₂):	É o mais abundante, sendo emitido como resultado das atividades humanas como o uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e a mudança no uso da terra e remoção de florestas. A quantidade de dióxido de carbono na atmosfera aumentou 35% desde a era industrial.
Gás metano (CH ₄):	É produzido pela decomposição da matéria orgânica, podendo ser encontrado 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.
Óxido nitroso (N ₂ O):	Suas emissões são resultantes principalmente do tratamento de dejetos animais, do uso de fertilizantes, da queima de combustíveis fósseis e de alguns processos industriais.
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆):	É utilizado principalmente como isolante térmico e condutor de calor. É o gás com o maior poder de aquecimento.
Hidrofluorcarbonos (HFCs):	São utilizados como substitutos dos clorofluorcarbonos (CFCs) em aerossóis e refrigeradores, que apesar de não afetar a camada de ozônio, têm alto potencial de aquecimento global.
Perfluorcarbonos (PFCs):	São utilizados como gases refrigerantes, solventes, propulsores, espuma e aerossóis.

Fonte: Adaptado de Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2012).

Para comparar e somar os gases de efeito estufa foi aplicada a métrica usual do Potencial de Aquecimento Global utilizada para inventários nacionais como fator de ponderação, a fim de se chegar a uma unidade comum, que é o equivalente de dióxido de carbono (CO₂-eq), escolhendo-se como parâmetro o CO₂. Dessa forma, todos os gases de efeito estufa são convertidos no equivalente de dióxido de carbono (CO₂-eq) (BRASIL, 2012). A Tabela 3 traz os valores de conversão dos GEE em CO₂-eq.

Tabela 3: Conversão dos GEE em CO₂-eq (GWP).

Gás	Símbolo	GWP
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	21
Óxido nitroso	N ₂ O	310
Hidrofluorcarbonos	HFC-23	11700
	HFC-125	2800
	HFC-134a	1300
	HFC-143a	3800
	HFC-152a	140
Perfluorcarbonos	CF ₄	6500
	C ₂ F ₆	9200
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	23900

Fonte: Adaptado de Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasil, 2016.

Dentre os GEE, destaque pode ser dado ao óxido nitroso (N₂O) e ao metano (CH₄) que são considerados os principais GEE, devido a sua elevada capacidade de aquecimento e seu tempo de permanência na atmosfera (RAMIRES, 2014). O N₂O e o CH₄ têm um potencial de aquecimento 310 e 21 vezes maior em relação ao CO₂, respectivamente, o que reflete em um expressivo efeito do forçamento radiativo da atmosfera, mesmo sendo emitido em menores quantidades.

As atividades antrópicas em todo o mundo relacionadas com a produção, consumo e o uso de energia são responsáveis pelas mudanças climáticas globais. Sendo assim, a busca por novas fontes de energia se tornou uma estratégia e uma questão de extrema importância do ponto de vista ambiental para reduzir os níveis CO₂ da atmosfera. O conceito de Potencial de Aquecimento Global foi desenvolvido para comparar a capacidade de cada GEE em reter o calor na atmosfera em relação à quantidade de CO₂ e, assim, ser possível a comparação entre as emissões de GEE em diferentes ambientes e/ou sistemas (RAMIRES, 2014).

2.2 INICIATIVAS INTERNACIONAIS ACERCA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As últimas décadas foram palco de inúmeras discussões acerca dos impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente. Por essa razão, surgiram, principalmente a partir do início da década de 60, iniciativas internacionais para tratar e regulamentar as relações entre as atividades humanas e o meio ambiente (CALDAS, 2016).

Em 1988 foi criado o Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC) pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial, a fim de tratar acerca do aquecimento global. O IPCC tornou-se uma importante fonte de informação científica relacionada às mudanças climáticas.

Em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Rio 92. Nesta ocasião foram reunidos 103 chefes de Estado, onde foram aprovados alguns acordos internacionais. Os desdobramentos dessas discussões resultaram na Agenda 21, documento que serviu como base para políticas, planos e programas ambientais de diversos países, inclusive do Brasil. A Agenda 21 é um documento que explicita as principais questões da relação do homem com o meio ambiente, por metas e ações a serem ratificadas como compromissos pelos países signatários, visando o desenvolvimento sustentável (CALDAS, 2016).

Considerando o impacto da construção civil, criou-se outro documento: Agenda 21 para Construção Civil. Por este documento ficaram estabelecidos critérios para uso racional de recursos especialmente em relação a perdas, desperdícios, durabilidade, conservação de água, qualidade interna do ar das edificações e eficiência energética (LOBO, 2010).

Em 1997, no Japão, foi assinado o Protocolo de Kyoto. O evento reuniu representantes de 166 países com o intuito de debater medidas a serem tomadas com relação às mudanças climáticas. Por meio deste documento, foram estabelecidas metas entre os países signatários, com vistas a uma redução gradativa das emissões dos gases do efeito estufa. Estabeleceu-se como objetivo para 37 países industrializados a redução dos GEE em 5,2% entre 2008 e 2012, com relação aos níveis de GEE em 1990. O documento propunha ainda que os países cooperassem entre si, compartilhando experiências a fim de mitigar os efeitos adversos das alterações climáticas.

Mesmo não sendo considerado um país industrializado, o Brasil tomou um passo importante dentro do contexto do Protocolo de Kyoto, aprovando em 2009 a Lei nº 12.187, que instituiu a

Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC); o Brasil adotou como compromisso nacional voluntário, realizar ações de mitigação das emissões de GEE, a fim de reduzir entre 36,1% e 38,9% as emissões projetadas até 2020. Com a PNMC, iniciou-se a elaboração dos Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima, regulamentados pelo Decreto nº 7.390 (BRASIL, 2010). Todos os setores devem contribuir com essas ações, inclusive a indústria da construção civil. Dessa forma, o aspecto de sustentabilidade tem tido cada vez mais importância na elaboração de projetos e escolha de materiais e técnicas construtivas.

Em dezembro de 2015 ocorreu em Paris, na França, a 21ª Conferência das Partes sobre Mudança do Clima (COP-21) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). A COP-21 foi um marco mundial acerca de discussões sobre redução das emissões de carbono pelos países e contenção do processo de aquecimento global.

Nesta ocasião, adotou-se um novo acordo global com o objetivo de reduzir os efeitos das mudanças climáticas e de emissões de gases de efeito estufa. O documento elaborado foi chamado de Acordo de Paris e foi assinado pelas 195 partes da UNFCCC e pela União Europeia. Um dos objetivos é manter o aquecimento global abaixo de 2° C, buscando esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 ° C acima dos níveis pré-industriais (ONU BR, 2015). O Brasil definiu metas de redução dos gases de efeito estufa para 2025 e 2030 (CALDAS, 2016).

Em 2016, foi realizada a 22ª Conferência das Partes sobre Mudança do Clima (COP-22), em Marrakesh, no Marrocos, cujo foco foi definir os meios e regras para a implementação das obrigações assumidas com o Acordo de Paris na COP-21 (SARNEY FILHO; MARCONDES, 2016).

A 23ª Conferência das Partes sobre Mudança do Clima (COP-23), realizada em 2017, em Bonn na Alemanha, foi a mais recente conferência realizada. Nela, mais de 20 países lançaram uma nova aliança global pela eliminação do carvão como fonte de energia tradicional, fazendo um apelo para que não seja construída mais nenhuma usina de energia de carvão.

Os 19 países-membros da “Plataforma Biofuturo” (grupo criado na COP-22 para promover uma bioeconomia sustentável), a qual o Brasil também faz parte, anunciaram um acordo formal sobre o desenvolvimento de metas para biocombustíveis e para construir um plano de

ação para alcançá-las. As metas da nova plataforma incluem dobrar a matriz bioenergética nos próximos 10 anos para alcançar a meta de redução da temperatura global e triplicar o uso de biocombustíveis na indústria do transporte até 2030, principalmente a partir de matérias-primas não comestíveis, incluindo resíduos e detritos (ONU BR, 2017).

2.3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E ACVCO₂ NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O termo sustentabilidade é muitas vezes empregado e vinculado erroneamente apenas ao âmbito ambiental. Porém, segundo UNEP (2007), a sustentabilidade é a associação entre os aspectos ambientais, sociais e econômicos. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU BR, 2012), o relatório “Nosso Futuro Comum”, publicado em abril de 1987 pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Comissão Brundtland, definiu o conceito de desenvolvimento sustentável como “o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades”.

Nesse sentido, o consumo de recursos materiais e energéticos é de grande importância no que tange à sustentabilidade. Segundo Pereira (2008), não existe taxa de consumo sustentável para recursos não renováveis. Pode-se falar de matérias primas renováveis somente quando a taxa de crescimento natural da matéria prima (taxa de rotatividade) é de ordem comparável à sua taxa de consumo (NABUT NETO, 2011).

O setor de construção civil, que é um dos principais consumidores de matérias-primas, colabora negativamente levando ao esgotamento de recursos (SOUZA *et al.*, 2016). Há necessidade do desenvolvimento de pesquisas que levem a um menor uso de recursos e consequentemente a menores taxas de emissões, reduzindo assim os impactos ambientais neste setor e identificando oportunidades de melhoria para soluções mais sustentáveis (SIERRA-PÉREZ; BOSCHMONART-RIVES; GABARRELL, 2016).

Para Nabut Neto (2011), os critérios de sustentabilidade devem ser levados em consideração, tais como uso eficiente de energia e água, utilização de materiais duráveis e de fácil desconstrução, especificações de materiais fabricados sem o uso de substâncias tóxicas e com baixa energia incorporada e adoção de processos produtivos que visem à minimização de perdas e que incluam a gestão dos resíduos gerados.

Segundo estudos do *Energy Information Administration* (EIA, 2018), a produção total de energia dos Estados Unidos aumentará em cerca de 31% de 2017 até 2050, devido principalmente ao aumento na produção de energias renováveis além da energia hidrelétrica, gás natural e petróleo bruto. No mesmo estudo, se prevê que as emissões de CO₂ relacionadas com a energia do setor industrial crescerão 0,6% ao ano de 2017 a 2050. O gás natural tem a maior parcela de energia e emissões de CO₂ no setor industrial ao longo do período de projeção. O custo relativamente baixo do gás natural levará a novos aumentos de uso e emissões.

Samani *et al.* (2015) apontam que a indústria da construção desempenha um papel vital na economia mundial. Este setor representa 25% da produção industrial europeia e estima-se que representará 14,6% do produto interno bruto global até 2020. Além disso, é responsável por aproximadamente um terço das emissões globais de carbono.

Neste contexto, o uso de energia no ciclo de vida e os impactos ambientais associados dos edifícios foram intensamente estudados nas últimas décadas. Os edifícios precisam de energia para a construção (energia incorporada), bem como o seu funcionamento (energia operacional).

Segundo relatório da Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2017), em 2016, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 428,95 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂-eq), sendo a maior parte (194,3 Mt CO₂-eq) gerada no setor de transportes. O setor elétrico brasileiro emitiu, em média, 101,3 kg CO₂ para produzir 1 MWh, índice muito baixo quando comparado com países da União Europeia, EUA e China.

Ainda no mesmo relatório aponta-se que produzindo e consumindo energia, cada brasileiro emite, em média, em 2016: 2,1 t CO₂/hab (emissão per capita brasileira), que é 7 vezes menos do que um americano e 3 vezes menos do que um europeu ou um chinês.

A oferta interna de energia no Brasil possui 43,5% de fontes consideradas renováveis. Porém, a matriz energética da indústria da construção civil é baseada em fontes que não são consideradas limpas. Por exemplo, somente considerando a indústria do cimento, o uso de petróleo como fonte de energia representa 71,37% de toda a energia consumida neste setor, isso sem contabilizar as demais fontes não renováveis (BRASIL, 2017).

O Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2017) apresenta dados de consumo energético para os 10 setores industriais que mais consomem energia no país. Destes, seis são atividades da construção civil, e representam 12,96% do consumo de energia total do país e 39,30% do consumo total do setor industrial.

Apesar de apresentar números expressivos, Sierra-Pérez; Boschmonart-Rives; Gabarrell (2016) apontam que o setor de construção representa a área com maior potencial de intervenção, e dessa forma, o aumento da eficiência energética dos edifícios é crucial para a transformação do panorama energético.

Nesse sentido, a crescente consciência ambiental suscitou grande atenção de muitos governos em todo o mundo. Inevitavelmente, os edifícios tornaram-se um dos principais objetivos para a melhoria ambiental, já que o setor de construção representava quase 40% do consumo mundial de energia, 30% do uso de matérias-primas, 25% dos resíduos sólidos, 25% do uso da água, 12% do uso da terra e 33 % das emissões globais relacionadas com GEE (CHAU, LEUNG E NG, 2015).

No Decreto no 7.390/2010, que regulamenta os Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima, a projeção de emissões de gases de efeito estufa foi estimada em 3.236 milhões de toneladas CO₂-eq para 2020. Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2016), a fim de alcançar o compromisso nacional voluntário, as ações previstas no decreto almejam reduzir tais emissões entre 1.168 milhões de toneladas CO₂-eq e 1.259 milhões de toneladas CO₂-eq, que correspondem a reduções de 36,1% e 38,9%, respectivamente, do total, limitando as emissões em até 2.068 milhões de toneladas de CO₂-eq para o ano em questão; em 2014 a emissão total de CO₂-eq foi de 2.059 milhões de toneladas.

Segundo dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2017), do Observatório do Clima, em 2016, o Brasil emitiu 2.278 milhões de toneladas de CO₂-eq. Considerando o tamanho do território nacional, 5% da superfície terrestre (LIRA, 2017), a contribuição do Brasil nas emissões globais de GEE é relativamente pequena, mas ainda assim é a sétima maior emissão do planeta (Tabela 4), sendo responsável por 3,4% das emissões mundiais (SEEG, 2017). Dessa forma, a responsabilidade do país em reduzir os impactos ambientais é cada vez maior.

Tabela 4: Ranking dos maiores emissores de GEE.

Classificação	País	Participação nas Emissões
1º	China	23,7%
2º	Estados Unidos	12,9%
3º	União Europeia	7,4%
4º	Índia	6,5%
5º	Indonésia	5,1%
6º	Federação Russa	4,2%
7º	Brasil	3,4%
8º	Japão	2,7%
9º	Canadá	1,8%
10º	Alemanha	1,7%

Fonte: Adaptado de SEEG, 2017.

Segundo Silva (2012), as mudanças no tratamento de questões ambientais representam importantes oportunidades de desenvolvimento para vários setores da cadeia produtiva. Entre as principais ações relacionadas a essa estratégia, destacam-se:

- Adoção de um novo paradigma de projeto, no qual as soluções são avaliadas considerando o ciclo de vida da edificação (incluindo custos de operação, uso, manutenção e desmontagem das edificações) e não apenas seus custos iniciais;
- Utilização de soluções que aumentem a flexibilidade das edificações e facilitem reformas e modernizações, como, por exemplo, a reposição de componentes e elementos;
- Utilização de materiais e componentes que resultem em menor impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida;
- Introdução de melhorias nos projetos e na gestão da produção, reduzindo a geração de resíduos nos canteiros de obras e proporcionando uma destinação adequada àqueles que são inevitavelmente gerados;
- Reutilização ou reciclagem de resíduos industriais e agrícolas pela construção civil, incluindo os próprios resíduos produzidos na construção e demolição de edificações.

Nesse contexto, uma importante ferramenta que permite avaliar as emissões de CO₂-eq ao longo de todo o ciclo de vida de uma edificação, é a ACVCO₂-eq. De acordo com Chau, Leung e Ng (2015), os estudos sobre emissões de CO₂ são mais recentes, quando comparados com os estudos de ACVE.

2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta usada para avaliar o desempenho ambiental considerando o ciclo de vida de uma edificação e a quantificação de diversas categorias de impactos ambientais. Segundo a ABNT NBR 14040: 2014, a ACV é um método no qual o produto ou processo é avaliado em todo o seu ciclo de vida: extração de matérias-primas, etapa de produção, fase de utilização, manutenção e a eliminação de resíduos.

A ABNT NBR 15575-1: 2013, recomenda aos projetistas que avaliem junto aos fabricantes de materiais, componentes e equipamentos, as informações relacionadas ao ciclo de vida, servindo como base para a tomada de decisão em relação aos impactos ambientais causados por estes elementos (CALDAS, 2016).

Segundo Lobo (2010), o uso da ferramenta ACV para avaliar impactos ambientais é reconhecido e difundido, principalmente nas atividades industriais. A análise gerada com os dados de entrada e de saída é de grande importância para estudos quantitativos de danos ambientais.

No âmbito da construção civil, a ACV pode ser utilizada em um produto, na composição de produtos formando sistemas e em sistemas compondo a própria edificação. A opção por determinado sistema construtivo pode ser influenciada pelo conhecimento das etapas do ciclo de vida e dos impactos ambientais dos produtos que compõe a edificação. É uma ferramenta que permite auxiliar os profissionais nas decisões de projeto, pois cada escolha provocará impactos distintos sobre meio ambiente (MACIEL, 2013).

Conforme ABNT NBR ISO 14040: 2014, quando o levantamento de dados da ACV abrange todas as fases do ciclo de vida de um produto ou processo, diz-se que esta é uma abordagem do tipo *cradle-to-grave*, ou berço ao túmulo. Essa abordagem compreende um inventário amplo e detalhado, que não é limitado apenas pelos processos industriais de produção dos materiais, mas envolve a natureza das matérias primas e recursos energéticos, diretos e indiretos, necessários, e ainda a destinação dos resíduos e subprodutos de cada etapa, além do próprio produto após sua vida útil (TAVARES, 2006).

Porém, segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2014, partes específicas do ciclo de vida podem ser analisadas isoladamente. Desse modo, o estudo de ACV pode ser classificado da seguinte forma:

- “Berço ao berço” (*cradle-to-cradle*): é possível realizar um estudo que considere desde a extração das matérias-primas, até a destinação dos resíduos, quando estes últimos são incorporados à fase inicial de outros processos produtivos, por meio da reciclagem ou reutilização. É a avaliação incluindo a retroalimentação dos resíduos no fluxo produtivo;
- "Berço ao túmulo" (*cradle-to-grave*): quando a ACV é usada para analisar os potenciais impactos ambientais de produtos em todos os estágios do seu ciclo de vida (extração da matéria prima à disposição final);
- "Berço ao portão" (*cradle-to-gate*): se considera o impacto da extração das matérias primas e a manufatura do material, até o momento em que o produto seja finalizado pela indústria. A avaliação do berço ao portão com opções inclui elementos da construção/instalação da edificação (EN 15804: 2013);
- "Portão ao portão" (*gate-to-gate*): é analisada apenas a fase que ocorre dentro dos limites físicos da fábrica.

A partir de uma análise de todo o ciclo de vida, é feita a mensuração de dados de entrada, como o consumo de matéria prima e energia, e de dados de saída, que são emissões, resíduos, produto final etc, como pode ser observado na Figura 2.

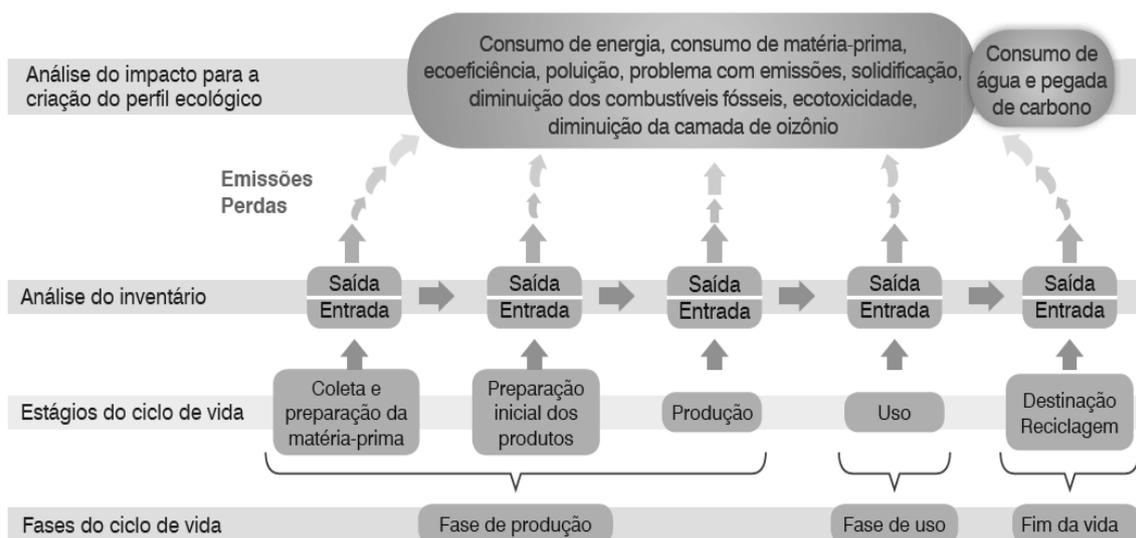


Figura 2: Fluxo ilustrativo de uma ACV.

Fonte: IBICT, 2014.

Assim, a ACV apoia a tomada de decisões por meio de estudos dos aspectos ambientais e dos impactos ao longo da vida de um produto ou processo, permitindo que se estabeleça uma

relação entre esses aspectos e categorias de impacto potencial, ligados ao consumo de recursos naturais, à saúde humana e ao ambiente (IBICT, 2014).

Pelo uso de uma ACV em um determinado produto, a tomada de decisão fica apoiada através de estudos de aspectos ambientais e possíveis impactos ao longo do ciclo de vida de um produto, contabilizando desde a extração dos recursos, a etapa de produção, o uso, tratamento pós-uso, a reciclagem e a disposição.

A ACV pode introduzir nas empresas responsáveis pela produção de materiais, componentes ou sistemas a noção de responsabilidade por todo o ciclo de vida, encorajando e auxiliando o processo de mudança para estratégias ambientalmente viáveis (EEA, 1997). Além disso, pode conduzir políticas econômicas a partir dos dados de consumo de matérias primas e recursos energéticos. Ainda, conforme consideração do IBICT (2014) pode-se adotar uma ACV para comparar produtos que tenham a mesma função, servindo de parâmetro para melhoria do desempenho ambiental de produtos, *ecodesign* e rotulagem ambiental.

O primeiro modelo de uma ACV surgiu a partir de um estudo encomendado pela Coca-Cola, em 1965, ao *Midwest Research Institute* – MRI, com o intuito de estimar os efeitos ambientais do uso de dois tipos diferentes de embalagens para refrigerante. Tal estudo foi aprimorado pelo mesmo instituto em 1974 a pedido da *Environmental Protection Agency* – EPA, e desde então, foram sendo desenvolvidos procedimentos similares em outros países (CHEHEBE, 1998).

A instituição *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), é uma organização científica, com representantes de universidades, governo e indústrias, que foi criada em 1979, nos Estados Unidos, e buscou, de forma pioneira, criar um padrão de interpretações e servir como um guia de estudo para a ACV. No entanto, somente a partir de 1989, com a criação da SETAC Europa, é que se iniciou o desenvolvimento dos estudos sobre ACV (TAVARES, 2006). Já no Brasil, a utilização da ACV iniciou-se de forma mais tardia, quando comparada ao uso desta metodologia nos países europeus e norte-americanos (SAADE, 2013).

No Brasil, a ACV é de competência do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), por meio do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). Através desse instituto, o Brasil passou a fazer parte da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida, importante fórum internacional para o desenvolvimento da ferramenta ACV. Dessa forma, o

país participa ativamente do seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, pode disponibilizá-la para a indústria nacional, favorecendo a competitividade em nível mundial (CAMPOS, 2012).

Em dezembro de 2010, o governo brasileiro aprovou a criação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) para disponibilizar e disseminar a ferramenta ACV. Ainda segundo Campos (2012), no contexto da América Latina, o Brasil é o único país que possui um programa de desenvolvimento de inventários de ciclo de vida em consonância com as diretrizes da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida, apoiado pelos Ministérios da Ciência e Tecnologia e de Desenvolvimento Indústria e Comércio. Contudo, apesar existência de um programa governamental, na prática ele ainda se encontra em um estágio inicial, principalmente pela pouca participação da indústria de forma aberta na disponibilização das informações.

Devido a sua elevada complexidade, principalmente no que tange ao levantamento de dados, a ACV é usualmente substituída por versões simplificadas ou recortes, em que se opta por analisar somente uma categoria de impacto (quantificação de consumo energético¹ ou emissões de CO₂, por exemplo). Segundo Chau, Leung e Ng (2015), essa simplificação facilita a busca de dados e a interpretação dos resultados.

Conforme salienta Lira (2017), as simplificações da ACV foram bem aceitas pelos pesquisadores da construção civil, seja na Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE), na Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂) ou ainda na Avaliação do Ciclo de Vida Modular² (ACV-m), principalmente devido à complexidade dos processos que envolvem o ciclo de vida das edificações.

A estrutura de uma ACV, conforme apresentado na Figura 3, compreende quatro etapas principais (ABNT NBR ISO 14040, 2014): definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

¹ Embora a energia não consista em uma categoria de impacto ambiental propriamente dita, ela vem sendo estudada nas ACVEs, utilizando o modelo de ACV, visto que sua obtenção acarreta impacto ambiental, e é possível correlacionar o gasto energético com emissões de CO₂ ou outros gases de efeito estufa.

² A ACV-m, desenvolvida pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), possui uma metodologia de análise que considera cinco aspectos mínimos: consumo de energia, água e matérias-primas, emissão de CO₂ e geração de resíduos.

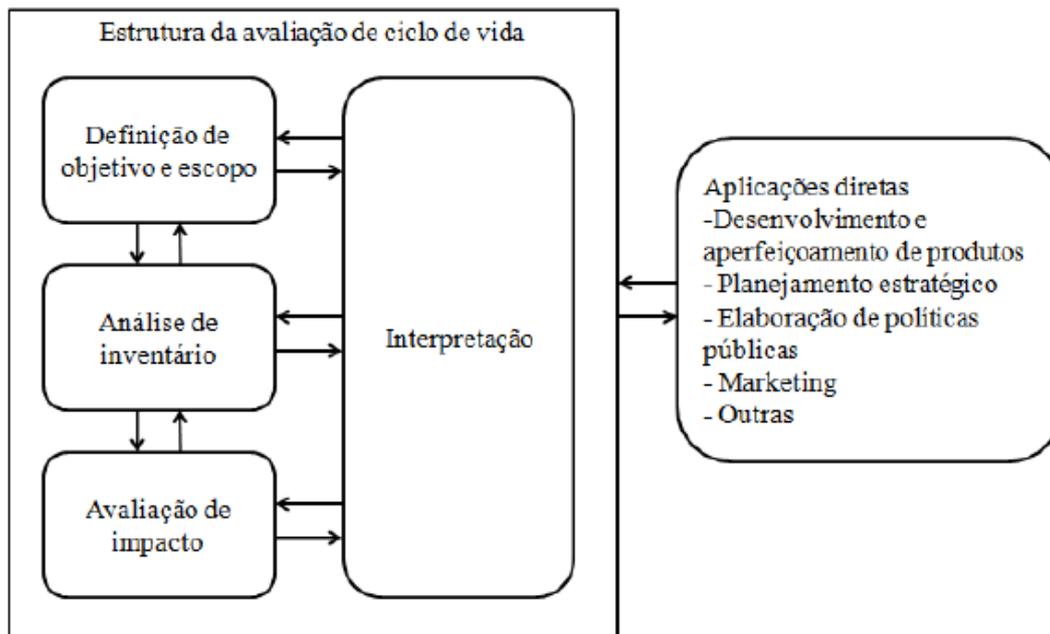


Figura 3: Estrutura de uma ACV.

Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2014.

São diversas as aplicações possíveis de uma ACV, a depender do nível da interpretação de seus resultados e da amplitude e detalhamento dos dados levantados. Desse modo, é uma importante ferramenta que pode balizar a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos, o nível de informação dos tomadores de decisão nos diversos setores do país, a seleção de indicadores de desempenho ambiental, o marketing, a rotulagem ambiental e a elaboração de uma declaração ambiental de produto – EPD ou DAP (ABNT NBR ISO 14044, 2009).

As aplicações diretas de uma ACV (Figura 3) são: desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas, marketing entre outras. Tavares (2006) cita algumas outras aplicações possíveis:

- Identificação da origem de um problema relacionado a um produto ou serviço;
- Levantamento detalhado dos limites do processo de um produto incluindo insumos, transporte e descarte;
- Orientação do *design* de novos produtos;
- Determinação da energia incorporada em um produto;
- Identificação das oportunidades de melhoria dos aspectos ambientais globais do produto;

- Comparação de características ambientais e econômicas das variantes para um determinado produto;
- Orientação à tomada de decisões e prioridades para desenvolvimento de produtos e, ou, políticas ambientais;
- Avaliação do desempenho ambiental.

2.4.1 Objetivo e escopo de uma ACV

Segundo Silva e Silva (2015), a definição do escopo é o estabelecimento do objetivo e das fronteiras do estudo, sua abrangência e profundidade. Conforme a ABNT NBR ISO 14040: 2014, para determinar os objetivos da ACV, é necessário definir:

- 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 e deve incluir, conforme recomendado pela ABNT NBR ISO 14040: 2014, os seguintes itens: sistema do produto, funções do sistema (ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas), unidade funcional, fronteiras do sistema, procedimentos de alocação, categorias de impacto, metodologias de avaliação de impacto e interpretação que serão adotadas, requisitos de dados, pressupostos, limitações, requisitos de qualidade dos dados, tipo de revisão crítica (se houver) e tipo e formato do relatório exigido para o estudo.

Em relação às fronteiras, elas podem ser geográficas (dados de localidades diversas), temporais (estudos de períodos diferentes) e tecnológicas (diferentes processos produtivos) (CALDAS, 2016).

A unidade funcional (UF), segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2009, é a unidade de referência em um estudo de ACV. O objetivo da UF é ser uma referência para relacionar as entradas e as saídas do sistema adotado. Isso é necessário para assegurar que possam ser feitas comparações entre diferentes estudos. Apesar das diferentes UF adotadas nos diversos estudos internacionais relacionados ao setor da construção civil, segundo Cabeza *et al.* (2014), a área construída e a edificação completa são as mais utilizadas.

O escopo é o planejamento de toda a ACV, e por isso, pode sofrer alterações durante andamento do estudo. Assim, à medida que são coletados dados e informações, o escopo pode ser adaptado a fim de atender ao objetivo proposto (LIRA, 2017).

2.4.2 Análise do inventário de uma ACV

Esta etapa compreende a coleta de dados e a escolha dos procedimentos de cálculo utilizados para contabilizar entradas e saídas do sistema. A análise de inventário é um processo iterativo, no qual podem ser acrescentados novos requisitos de dados ou limitações. Em alguns casos, devido às condições do sistema, são realizadas revisões do objetivo e escopo do estudo (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

Os dados para cada processo unitário dentro das fronteiras do sistema podem ser classificados em:

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

2.4.3 Avaliação de impacto de uma ACV

São utilizados os resultados dos fluxos do inventário (*input-output*) para estabelecer correlação com os potenciais impactos ambientais de diferentes categorias (meio ambiente, saúde humana e uso de recursos) relativos ao produto ou processo em estudo. Ou seja, os resultados numéricos do inventário são transformados em valores de impacto ambiental (SAADE *et al.*, 2014). Essa etapa fornece informações para a etapa de interpretação de resultados.

Salienta-se que a etapa de avaliação dos impactos possui limitações, visto que apenas os impactos ambientais definidos no objetivo e escopo são avaliados, de modo que outras questões ambientais relevantes podem ser desconsideradas (ABNT NBR ISO 14040: 2014).

Segundo John (2000), é conveniente reduzir a quantidade de análises a fim de facilitar a comparação quando se tem várias categorias de impacto. Os dados coletados referentes às entradas e saídas dos fluxos elementares são transformados em indicadores de impactos relacionados à saúde humana, meio ambiente e esgotamento de recursos. A escolha dos impactos ambientais que serão analisados depende da importância relativa dada a cada um pela agenda ambiental de cada país, podendo ainda ser mais restrita a determinada região ou setor industrial.

Os resultados obtidos nessa etapa não devem ser vistos como previsões reais de efeitos ambientais e sim como potenciais indicadores ambientais (MENDES, 2013). A avaliação de impacto pode ser realizada por meio de três elementos obrigatórios de verificação e três elementos opcionais. Os elementos obrigatórios são: as categorias de impacto (identificação da questão ambiental), a classificação (relação das informações coletadas no inventário com algum problema ambiental) e caracterização (quantificação ambiental do prejuízo) (CAMPOS, 2012):

- a) Seleções de categorias de impacto: seleção dos indicadores de categorias ou modelos de caracterização que serão definidos, preferencialmente com base no conhecimento científico dos processos e mecanismos ambientais.
- b) Classificação: é feito a classificação e agrupamento dos dados de inventário nas diversas categorias selecionadas, como aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação, toxicidade humana, exaustão dos recursos naturais, etc.
- c) Caracterização: tal como transcrito na ABNT NBR ISO 14044: 2009, a caracterização envolve a concepção dos resultados do inventário para unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos dentro da mesma categoria de impacto.

Em caráter opcional, segundo Campos (2012) são considerados os procedimentos de normalização, agrupamento, ponderação e análise da qualidade dos dados, cujas aplicações se destinam à consolidação do perfil de cargas ambientais em um índice único.

2.4.4 Interpretação de uma ACV

A fase de interpretação consiste em compreender os resultados das etapas de análise de inventário e avaliação de impacto, apresentando conclusões e medidas de melhoria, de forma

consistente, segundo os objetivos e escopo do estudo. Conforme Mendes (2013), isso pode ser feito por meio de procedimentos para identificar, qualificar, conferir, avaliar e apresentar as conclusões baseadas nas constatações do estudo.

A fase de interpretação de uma ACV compreende as três etapas seguintes (CAMPOS, 2012):

- a) Identificação das questões significativas: identificação e estruturação da informação; critérios de alocação; modelos e fatores de caracterização e indicadores de categoria; identificação das escolhas de valor usadas no estudo e o papel e as responsabilidades das diferentes partes interessadas; e a significância de categorias de dados, categorias de impacto e processos elementares incluídos no processo;
- b) Avaliação: deve-se assegurar a relevância, a disponibilidade e a completude dos dados, além da confiabilidade dos resultados e a consistência das suposições, métodos e dados;
- c) Conclusão: após colhidas e avaliadas as informações, é, então, elaborado um relatório sobre as questões de maior relevância ao processo.

2.4.5 Fases do ciclo de vida

De modo geral, têm-se três principais fases que são compreendidas dentro de um estudo de ACV: pré-uso, uso e fim de vida, esta última também denominada de pós-uso ou desconstrução em alguns estudos.

Tavares (2006) divide as três fases, denominadas por ele como pré-operação, operação e pós-operação, em etapas. Na fase pré-operação tem-se as etapas extração e produção de materiais, transporte de materiais, execução, transporte de trabalhadores, desperdício de materiais e transporte do desperdício. Na fase de operação tem-se reposição de materiais, equipamentos eletrodomésticos e cocção de alimentos. E por fim, na fase pós-operação tem-se demolição e transporte de resíduos.

Maciel (2013) divide ainda a fase de uso nas fases de uso e fase operacional:

- Fase de Pré-Usado: inclui extração de matéria-prima, transporte, produção, transporte até o canteiro de obras, instalações técnicas na execução;

- Fase de Uso (operação): abrange todas as atividades relacionadas com o uso da edificação, durante sua vida útil, como equipamentos de climatização, aquecimento de água, iluminação, cocção e alimentação de aparelhos eletrônicos;
- Fase de Manutenção: inclui as atividades relacionadas com reformas/manutenções periódicas da edificação, em função da depreciação dos materiais ou por senso estético, com uso de materiais de construção e transporte;
- Fase de Desconstrução: inclui a destruição da edificação e transporte dos materiais para o aterro e/ou central de reciclagem.

Lira (2017), Caldas (2016), Pedroso (2015), Paulsen e Sposto (2013), dentre outros, adotaram as fases como sendo: pré-uso, uso e fim de vida, abordagem adotada também nessa pesquisa.

Segundo Chau, Leung e Ng (2015), a fase de uso é dominante no consumo de energia e nas emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida. Como aponta o autor, a fase de uso contribuiu com grande parte do impacto no potencial de aquecimento global (90%), quando analisadas as casas geminadas no Reino Unido.

A busca por edificações com maior vida útil e o aumento do uso de equipamentos eletrônicos aumentou ainda mais a participação da etapa de operação no desempenho ambiental do edifício, principalmente nos países desenvolvidos. Assim, para minimizar esse impacto, vem sendo desenvolvidas tecnologias que melhorem a eficiência energética dos equipamentos, surgindo ainda o conceito de edifícios zero energia (*net zero energy buildings*). Assim, na medida em que mais ações desse tipo são tomadas, a fase de pré-uso (no que tange à produção e ao transporte de materiais, bem como a etapa de construção) torna-se mais expressiva em relação à energia e às emissões de GEE (SILVA; SILVA, 2015).

Segundo Sartori e Hestnes (2006), o somatório das energias consumidas para a construção, desconstrução e transporte de uma edificação corresponde a 1% da energia total de uma edificação, considerando esta como o somatório das energias incorporadas em seus materiais e a energia operacional. O estudo desenvolvido por estes autores analisou os dados relativos a 60 ACV's de edificações de várias partes do mundo, concluindo que a energia de operação representa a maior parcela de energia consumida, e assim, leva a um maior percentual de emissões de GEE nessa etapa, frente às emissões totais do ciclo de vida.

2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO

Duas abordagens de caracterização podem ser aplicadas para quantificar os impactos ambientais: a abordagem orientada a problemas (*midpoint*) e a orientada a danos (*endpoint*) (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). Existe ainda uma abordagem combinada (MENDES, 2013), que mescla as vantagens das duas.

A abordagem *midpoint* utiliza valores no início ou no meio de um mecanismo ambiental. Os impactos são classificados em termos ambientais, como potencial de aquecimento global, potencial de acidificação e potencial de depleção da camada de ozônio. Este tipo de abordagem gera um resultado mais completo dos impactos ambientais, mas requer bons conhecimentos de ACV para interpretá-lo (Chau, Leung e Ng, 2015).

Já a abordagem *endpoint* considera todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final. Pode ser calculada em um único valor, facilitando a compreensão, mas diminuindo a transparência e aumentando muito as incertezas. Os impactos, nessa abordagem, são agrupados em categorias mais gerais, como saúde humana, meio ambiente e recursos, que eventualmente podem ser calculados como um resultado único (Chau, Leung e Ng, 2015).

Existe ainda o método denominado de análise híbrida, em que são listados os insumos considerados em cada etapa de estudo de caso e os fatores utilizados são provenientes de diversas fontes consultadas, buscando adequar à realidade do local que está sendo avaliado. Dentre essas fontes de dados, têm-se as Declarações Ambientais de Produto – DAP (EPD, em inglês), os dados da literatura, encontrados em artigos e outras publicações de estudos realizados, e os diversos bancos de dados existentes no mundo.

As DAP's são estratégias adotadas para comunicação externa sobre desempenho ambiental e estão empenhadas em reduzir os impactos ambientais de um produto. Essas declarações são baseadas nas premissas da ACV e contém informações acerca da aquisição de matérias-primas, uso de energia, conteúdo de materiais e substâncias químicas, emissões para o ar, terra e água, e geração de resíduos. No contexto da construção civil, há DAP's para diversos materiais, como concreto, madeira, metais, alumínio, entre outros (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009).

Os principais métodos de avaliação de impacto existentes no mercado utilizam uma dessas três abordagens (LIRA, 2017). Com a abordagem *midpoint*, os impactos podem ser avaliados usando os métodos CML 2001, EDIP 97 e EDIP 2003 e IMPACT 2002+. Já com a

abordagem *endpoint* tem-se o Ecoindicator 99 e o IMPACT 2002+, que são usados no método de danos (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). Segundo Ferrández-García, Ibáñez-Forés e Bovea (2016), o método CML 2001 é o mais amplamente utilizado.

O CML ou *Dutch Handbook on LCA* é um manual holandês publicado em 2002 que apresenta diretrizes para a realização de um estudo de ACV, baseado nas normas ISO (Guinée *et al.*, 2002). Conforme Lira (2017), 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:

- 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.

As categorias de impacto abordadas pelo método CML são descritas resumidamente conforme definições de Chenani *et al.* (2015) e Han *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, como carvão bruto, petróleo bruto, argila, feldspato e material de ferro. 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 SO₂ ou NO₂, 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 SO₂;
- Potencial de eutrofização: refere-se à libertação de níveis elevados de macronutrientes, tais como nitrogênio e fósforo, para o ambiente. O teor excessivo de nitrogênio (N) e fósforo (P) e outros nutrientes fazem com que os organismos aquáticos, especialmente as algas, floresçam, resultando na diminuição do oxigênio dissolvido na água. A unidade deste fator é kg de PO₄²⁻ 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 à kg de CO₂-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 à 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 poluição fotoquímica é um problema regional de poluição ambiental e que pode acarretar doenças respiratórias humanas e prejudicar o crescimento das culturas. A unidade desse fator é kg de equivalentes de etileno (C₂H₄);
- 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).

2.6 BANCOS DE DADOS E FERRAMENTAS DE APOIO À ACV

Os bancos de dados são constituídos por informações de caráter ambiental, que dizem respeito à produção de bens de consumo, à disponibilização de recursos energéticos e à realização de serviços, e são provenientes de várias bases. Tais bases são inventários do ciclo de vida de componentes que podem fazer parte de diversos outros ciclos de vida. Como exemplos desses

componentes podem ser citados: materiais (poliméricos, metálicos, cerâmicos, combustíveis, fertilizantes, entre outros), energia, atividades de transporte e gerenciamento de resíduo (GRISOLI, 2011).

Na execução de uma ACV, é necessário o uso de um grande número de dados relativos aos insumos e processos relacionados ao ciclo de vida. Esses dados devem ser representativos para os dados reais da região que se pretende avaliar. Dessa forma, passa a ser necessário o auxílio de bancos de dados; a incorporação dos bancos de dados em um *software* torna possível a edição dessas informações e a escolha do dado que melhor caracterize a situação real em estudo.

No entanto, verifica-se que são poucos os países que possuem, em seus bancos de dados, a descrição de informações regionais. Essa situação provoca imprecisões nos estudos, visto que na ausência de dados regionais o mais comum é a utilização de dados representativos. Dessa forma, os programas criados para apoio aos estudos de ACV buscam como uma prioridade o desenvolvimento de bancos de dados regionais, visto a necessidade de grande quantidade de informações relativas a área estudada durante a análise de inventário, que é a fase mais trabalhosa devido a indisponibilidade de dados, que por vezes precisam ser estimados.

Nos países desenvolvidos existem bancos de dados adequados às suas condições. Como exemplos, Mendes (2013) cita que:

- Na Suíça, o Instituto Federal Suíço para Pesquisa e Teste de Materiais – EMPA lançou o projeto Ecoinvent, que possui mais de 2.700 unidades de processos em seu banco de dados;
- Na Alemanha tem-se a “Rede de Inventários de Ciclo de Vida Alemã” e dois importantes *softwares* de ACV: Umberto e GaBi;
- Na Dinamarca há o Centro Dinamarquês de ACV (*LCA Center Denmark*);
- Na Suécia foi criado o *Centre for Environmental Assessment of Product and Material Systems* (CPM), dentro da Universidade de Chalmers;
- O Japão desenvolveu o Projeto Nacional de Avaliação do Ciclo de Vida, no qual o governo, instituições de pesquisa, indústria e academia participaram da construção de um banco de dados com dados primários;
- A América do Norte possui projetos de bancos de dados em andamento, como o da Agência de Proteção Ambiental Americana de ACV e o Projeto de Banco de Dados

ICV do Departamento de Energia Americano, além do Banco de Dados de Matérias Primas Canadenses e o Instituto de Materiais Sustentáveis Athena, no Canadá.

Ressalta-se que as peculiaridades e a diversidade de cada local são de grande importância nos estudos de ACV e devem ser consideradas na construção de um banco de dados comum de consumos e emissões com a finalidade de alimentar as análises energético-ambientais (PEDROSO, 2015). Tendo em vista o crescente interesse em aplicar a ACV, Hellweg e Canals (2014) afirmam que é necessária uma maior cobertura de dados de inventário e impactos para fornecer respostas a situações decorrentes de sistemas de produção e consumo cada vez mais complexos.

2.7 PROGRAMA BRASILEIRO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (PBACV)

O Brasil se destaca na América Latina com um programa de desenvolvimento de inventários de ciclo de vida, o projeto “Inventário do Ciclo de Vida para a Competitividade Ambiental da Indústria Brasileira”, desenvolvido em total consonância com as diretrizes da Plataforma Internacional do Ciclo de Vida.

Esse projeto foi coordenado pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro, sendo executado pelo IBICT juntamente com UNB, USP e UTFPR, e contou com o apoio do Ministério da Ciência e Tecnologia e do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (BRASIL, 2010).

Apesar da iniciativa, ainda se fazia necessário que as informações padronizadas sobre a elaboração de inventários fossem difundidas, de modo que os setores produtivos fossem envolvidos na implantação da ACV no Brasil. Desse modo, foi aprovado pelo Conmetro o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), por meio da Resolução nº 04/2010, com o objetivo de inserir e tornar efetiva a ACV como uma prática de apoio à sustentabilidade ambiental no Brasil (MENDES, 2013).

O PBACV estabelece diretrizes no âmbito do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Sinmetro, que visam apoiar o desenvolvimento sustentável e a competitividade ambiental da produção industrial brasileira, e promover o acesso aos mercados interno e externo. Para sua implantação, o PBACV deve estar alinhado às políticas

públicas ambientais e de sustentabilidade, como o Plano Nacional de Consumo Sustentável e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

O PBACV está alinhado com o Sistema Internacional de Referência de Dados de Ciclo de Vida de Produtos e Processos (ILCD, em inglês). O ILCD oferece uma base comum para dados consistentes e estudos sobre ciclo de vida, que apoiam ferramentas de consumo e de produção sustentáveis, como a rotulagem ambiental, o *ecodesign*³, a pegada de carbono e as compras públicas ecológicas. Com base nele, o PBACV segue o padrão internacional, favorecendo a troca de informações e a integração de dados e resultados em diferentes países e regiões (PEDROSO, 2015).

Em 2015, o Manual do ILCD foi traduzido pelo IBICT para a língua portuguesa, como um guia orientativo. A disponibilidade do manual em português colabora na tentativa de disseminá-lo pelo país e atender aos requisitos para inserção de dados no Sistema de Inventários do Ciclo de Vida do Brasil.

2.8 GaBi

O GaBi é um *software* alemão que combina modelagem, relatórios e base de dados a fim de construir balanços de ciclo de vida. É uma ferramenta utilizada para avaliar não somente aspectos ambientais, mas também aspectos sociais, econômicos, processos e tecnologias que estejam associados ao ciclo de vida de um produto, sistema ou serviço (CARDOSO, 2015; VINHAL, 2016). Permite a inserção de uma quantidade expressiva de dados, além da modelação do ciclo de vida do produto, levando à análise e definição de soluções para diversos problemas (CAMPOS, 2012).

O *software* GaBi inclui vários métodos para a avaliação das categorias de impacto, sendo elas CML 2001, Impact 2002+, ReCiPe, entre outras. O CML ou *Dutch Handbook on LCA* (Manual Holandês de ACV) apresenta diretrizes operacionais para a realização de um estudo de ACV, com base nas normas ISO (GUINÉE *et al.*, 2002), e seus modelos de caracterização foram selecionados através da revisão das metodologias existentes no mundo.

³ *Ecodesign* analisa a relação entre um produto e o meio ambiente. Também resume técnicas para reduzir o impacto ambiental ao longo dos diferentes estágios do ciclo de vida (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009).

O método CML 2001, desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (Holanda), avalia as categorias pela abordagem *midpoint*. Tais categorias são: depleção abiótica, potencial de acidificação, eutrofização, potencial de aquecimento global, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, e toxicidade humana.

O GaBi possibilita uma análise estruturada, porém complexa, visto que possui problemas de ordem técnica como a falta de praticidade em sua operação, sendo muitas vezes necessário um especialista para realizar um estudo completo que atenda a todos os pontos exigidos pela ferramenta (CARDOSO, 2015).

Este *software* apresenta um banco de dados abrangente, que é regularmente atualizado com base em recursos da indústria, conhecimento científico, literatura técnica e informações internas sobre patentes. O GaBi utiliza bases de dados de grandes metodologias de avaliação de impacto, como EUA LCI, EcoInvent, etc (SALCIDO; RAHEEM; RAVI, 2016).

É a ferramenta de apoio a ACV que possui a maior base de dados internamente consistente desenvolvida na Alemanha, que objetiva fornecer informações únicas e atualizadas de inventário de ciclo de vida para usuários comerciais. Esta base de dados compreende um conjunto de dados primários coletados internacionalmente da indústria, de associações e do setor público. O banco de dados GaBi é usado como banco de dados de referência em Ökobau.dat, que constitui a base para o cálculo de ACVs de construção no contexto do DGNB: sistema de certificação de construção alemão (TAKANO *et al.*, 2014).

2.9 VEDAÇÕES VERTICAIS EM PAREDE DE CONCRETO

As vedações verticais e horizontais compõem a envoltória da edificação, que é um dos principais elementos que constituem o edifício. A envoltória é responsável por preservar o ambiente interno dos agentes ambientais externos, tais como poluição, ruídos, vento, chuva e radiação solar, desempenhando papel fundamental nas questões de conforto ambiental e consumo de energia (CALDAS, 2016).

Campos (2012) aponta o sistema de vedação como um dos principais gargalos tecnológicos da construção de edifícios, principalmente pela importância para a introdução de novos materiais, componentes e sistemas construtivos, e também como um dos pontos críticos para a

implantação de medidas de racionalização da produção de edifícios, por ser um dos principais subsistemas e pela influência significativa que exerce no seu desempenho final (CAMPOS, 2012).

A construção da parede deve cumprir duas funções principais: suportar a integridade estrutural de um edifício e proteger seu interior de condições climáticas externas, ajudando a manter o isolamento térmico. As características da parede (incluindo sua espessura) são definidas para garantir resistência estrutural, isolamento térmico, isolamento acústico, e estética. Em geral, as paredes feitas com blocos cerâmicos apresentam melhor isolamento térmico do que as paredes de concreto (SOUZA *et al.*, 2016).

Os sistemas construtivos utilizados na produção das vedações na maioria das obras brasileiras apresentam um elevado desperdício de mão-de-obra, componentes e materiais, devido ao emprego de técnicas não racionalizadas. Além da função de dividir o ambiente em compartimentos, as vedações de um sistema construtivo deve também protegê-lo, servir de suporte e proteção às instalações do edifício, aos equipamentos de utilização do edifício, criar condições de habitabilidade e suprir a função estrutural ou parte da mesma (SACHT, 2008).

Há diversas tecnologias construtivas para se executar uma vedação vertical, dentre elas, tem-se: de alvenaria, composta por blocos unidos entre si por juntas de argamassa, formando um conjunto rígido e coeso (blocos de concreto, cerâmico, concreto celular, solo cimento maciço e blocos de rocha); maciças, moldadas no local, empregando-se fôrmas laterais, com a possibilidade de uso de diferentes materiais (de concreto, de solo cimento, de taipa, de concreto celular); maciças pré-fabricadas ou pré-moldadas, que são aquelas constituídas pelo acoplamento de painéis pré-moldados ou pré-fabricados (NABUT NETO, 2011).

O sistema de vedação convencional em blocos cerâmicos é o mais adotado no país, visto que é o mais difundido em todas as regiões, constituído basicamente como sendo uma estrutura reticulada formada pela interação de pilares, vigas e lajes, perfazendo um conjunto tal que, com as vedações de alvenaria, constitui o conjunto da edificação. Este sistema construtivo é normatizado pela ABNT-NBR 6118: 2013 e suas normas complementares e as normas ABNT NBR 15270-1: 2005, ABNT NBR 15270-3: 2005, de blocos cerâmicos e complementares (PEDROSO, 2015).

Os sistemas construtivos refletem um determinado estágio tecnológico que induz a forma de executar as construções. Este estágio acompanha o grau de desenvolvimento em que se

encontram as indústrias de materiais e equipamentos, máquinas e ferramentas, e atualmente existem vários sistemas para a construção de HIS. Dentre esses sistemas, têm-se os convencionais, cujos principais elementos são executados dentro do canteiro e suas técnicas construtivas e materiais são tradicionais; os racionalizados, onde parte dos elementos é pré-fabricada e a montagem ocorre no local da obra usando técnicas convencionais; e ainda os industrializados, nos quais grande parte dos elementos é transportada da fábrica para a obra, onde ocorre a montagem e o acabamento (SACHT, 2008).

Em 1966, a criação do Banco Nacional da Habitação – BNH subsidiou vários programas habitacionais da década de 70. O uso do sistema de parede de concreto iniciou-se entre 1970 e 1980, inspirado em construções feitas de concreto celular (sistema Gethal) e concreto convencional (sistema Outinord), sendo o primeiro registro desse sistema construtivo no Brasil em 1979, pela COHAB-MG, na execução de 46 unidades habitacionais na cidade de Santa Luzia – MG. Nessa obra, foram empregadas fôrmas metálicas (alumínio) e concreto celular. Porém, devido à falta de escala e de continuidade de obras nesses padrões, principalmente pelas limitações de recursos financeiros para habitação na época, e também devido à extinção do BNH na década de 80, a consolidação desse sistema na construção civil brasileira se deu de forma tardia (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2007-2008; SACHT, 2008).

Em 1980 o sistema de paredes de concreto foi novamente utilizado pela COHAB-MG na construção do Conjunto Habitacional Dr. Pedro Afonso Junqueira em Poços de Caldas - MG. Nos anos 80, também há registro de sua utilização para a construção de habitações de interesse social nas cidades de Natal - RN e Manaus - AM. No início da década de 90 novamente foram construídos edifícios de múltiplos pavimentos utilizando esse sistema em Manaus - AM, devido à escassez de componentes de alvenaria de boa qualidade no local (SACHT, 2008).

Esta vedação constitui-se por concreto comum, com adição de fibras de polipropileno na proporção de 300 g/m³. A resistência característica à compressão especificada é de no mínimo f_{ck} 25 MPa, com massa específica igual a 2300 kg/m³. O abatimento (*slump*) especificado para o concreto das paredes é de 20 + ou – 3 cm. A resistência mínima especificada para desforma das paredes após 24 horas da concretagem é de 3 MPa (SINAT/DATec n° 010, 2012).

Nesse sistema construtivo a estrutura de fundação é usualmente do tipo radier para as habitações térreas, podendo variar conforme as características do terreno. A fundação tipo radier tem a vantagem de proporcionar uma base de trabalho apropriada para as ações das equipes de montagem das fôrmas e instalações, além de permitir o posicionamento das instalações de entrada e saída pelo piso, tais como as redes de esgoto (SACHT, 2008). Na Figura 4 é apresentado um modelo mostrando como as armaduras compõem as paredes de concreto, formando um conjunto monolítico.

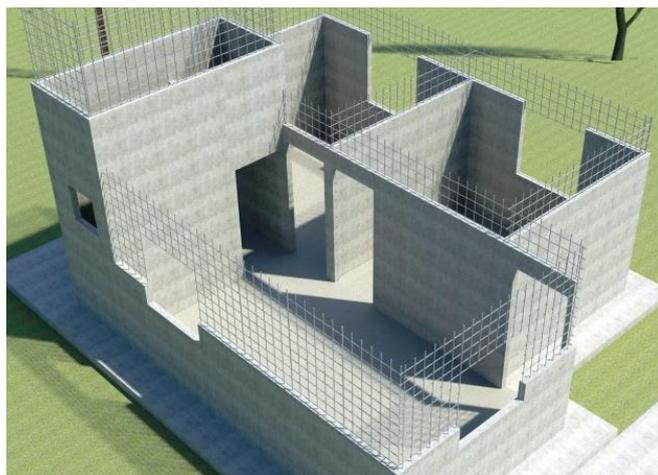


Figura 4: Esquema de inserção de armaduras.

Fonte: Pedroso, 2015.

Uma característica deste sistema tem sido o alto custo das fôrmas de alumínio, fato que restringe o uso em obras com menos de 800 unidades. A tecnologia teve forte influência de cultura construtiva de outros países da América, como EUA, Colômbia e México, assim como países da Europa, como, por exemplo, a França. As paredes moldadas no local são constituídas de concreto armado e têm sido projetadas com espessura de 10 cm e altura igual ao pé direito de cada unidade habitacional. As vedações de concreto moldadas no local têm sido utilizadas com frequência no DF, como exemplo o Jardim Mangueiral, com 8000 unidades (PEDROSO, 2015).

A ABNT NBR 16055: 2012 contém as normativas referentes ao sistema de parede de concreto e determina os requisitos necessários do ponto de vista estrutural. Segundo a referida norma, parede de concreto é um “elemento estrutural autoportante, moldado no local, com comprimento maior que dez vezes sua espessura e capaz de suportar carga no mesmo plano da parede”. Trata-se de um sistema construtivo racionalizado, no qual as funções estruturais e de vedação são desempenhadas por um único elemento.

As paredes são moldadas em uma única etapa de concretagem, monoliticamente, de modo que após a desforma apresentem vãos para portas e janelas, podendo incorporar, durante o processo de produção, parte das instalações dos sistemas prediais e esquadrias ou serem construídos *shafts* para sua disposição. Basicamente, o sistema de parede de concreto é composto por um jogo de fôrmas, armaduras centralizadas (telas soldadas e barras) e concreto.

O sistema de fôrmas tem como função moldar o concreto fresco, e necessita de projeto específico. É possível encontrar no mercado alguns tipos de tecnologias de fôrmas, sendo as principais as de alumínio, de plástico, e as mistas de madeira compensada com estrutura metálica. As fôrmas de alumínio são as mais utilizadas principalmente devido à alta produtividade e a maior capacidade de reutilização. Elas permitem uma boa qualidade superficial do concreto, entretanto são as que apresentam maior custo (NAKAMURA, 2014).

A execução em paredes de concreto segue algumas etapas principais, como pode ser visto na Figura 5 a seguir.

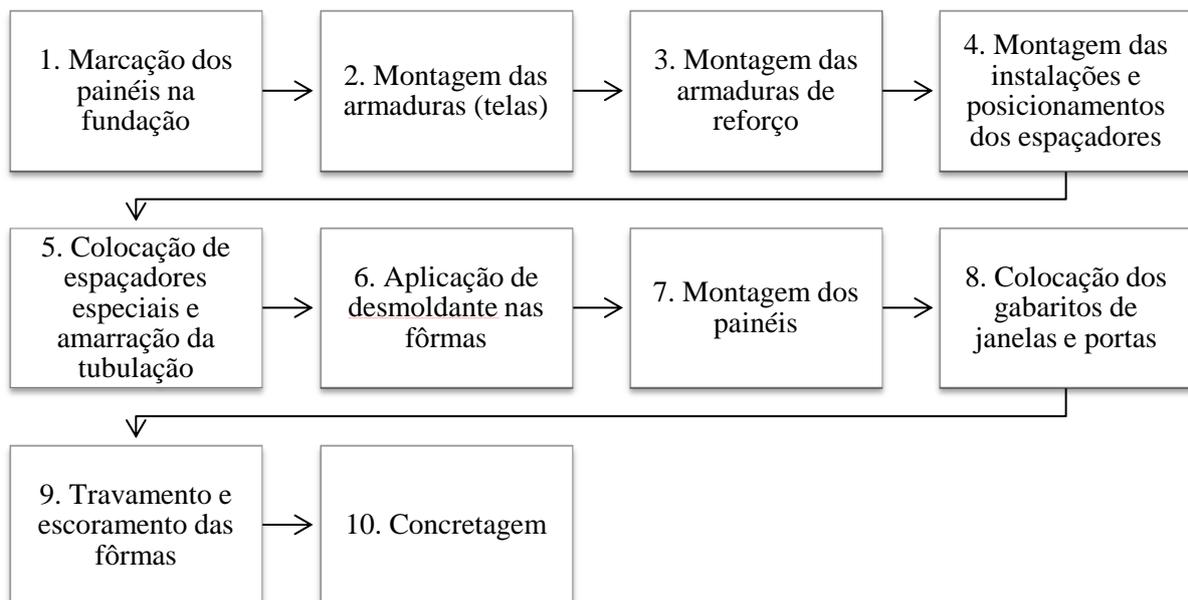


Figura 5: Fluxo de produção em paredes de concreto.

Segundo Sacht (2008), o sistema de parede de concreto apresenta diversas vantagens, principalmente quando considerados projetos com grande escala de repetição, visto que por ser racionalizado, possui maior produtividade, já que exige um planejamento maior e prévio, com uma sequência ordenada de trabalho. Com isso, tem-se um índice de perdas menor e um

aumento da qualidade no acabamento. No entanto, apesar do grande potencial de utilização, as fôrmas possuem elevado custo inicial na aquisição, e o sistema apresenta limitações na mudança do projeto de arquitetura devido à função estrutural das vedações.

Assim, questiona-se diante das vantagens apresentadas por este sistema construtivo, se ele possui desempenho superior ao sistema convencional quanto ao aspecto da sustentabilidade ambiental, especificamente nas emissões de GEE, e quais são os percentuais apresentados nas suas diversas etapas do seu ciclo de vida considerando sua implantação em Brasília.

2.10 ACV EM PAREDE DE CONCRETO

Na literatura internacional, diversos autores aplicaram a metodologia de ACV em paredes de concreto, conforme apresentado a seguir.

Yepes *et al.* (2012) apresentam uma metodologia para projetar muros de contenção de concreto para a construção de estradas usando um método estratégico de otimização baseado em um algoritmo que é aplicado a duas funções objetivas: as emissões de dióxido de carbono (CO₂) incorporadas e o custo econômico de paredes de concreto armado em diferentes estágios de produção, transporte e construção de materiais. Foram avaliados cenários com variação de espessura, altura da parede, tipos de material e tipologia de reforço. Os resultados mostraram que as emissões incorporadas e os custos estão intimamente relacionados, e que soluções mais sustentáveis podem ser usadas com um incremento de custo inferior a 1,28%. A análise também indicou que a redução de custos de 1€ (euro) poderia economizar até 2,28% kg nas emissões de CO₂. Finalmente, as paredes otimizadas em termos de custos exigem aproximadamente 4,8% mais concreto do que as ambientalmente favoráveis, porém estas precisam de 1,9% mais de aço.

Pretot, Collet e Garnier (2014) produziram um estudo sobre ACV de paredes constituídas por um material ecológico utilizado para a construção civil, concreto de cânhamo⁴. Os resultados mostraram que a fase de produção das matérias-primas é a principal responsável pelo impacto ambiental da parede, principalmente devido à produção de aglutinantes. Também foi demonstrado que, em comparação com os materiais de construção tradicionais, o concreto de cânhamo tem um baixo impacto ambiental. A renovação do revestimento, no que se refere à

⁴ Cânhamo é um tipo de fibra obtida a partir da planta *Cannabis sativa*.

etapa de manutenção, afeta ligeiramente o impacto ambiental para um pequeno número de renovações, mas leva a efeitos negativos se forem muito numerosos.

Souza *et al.* (2016) compararam o desempenho ambiental de três tipos de paredes: bloco cerâmico, bloco de concreto e paredes externas reforçadas de concreto moldado no local. Os resultados foram analisados com o *software* SimaPro 7.3 e com o método de avaliação IMPACT 2002+. Verificou-se que as paredes de blocos cerâmicos apresentam impacto inferior ao do bloco de concreto e das paredes de concreto em três diferentes categorias de impacto: Mudança Climática, Uso de Recursos e Remoção de Água. Os resultados não foram significativos quanto aos impactos na Saúde Humana e na Qualidade do Ecossistema.

Agustí-juan *et al.* (2017) investigaram as oportunidades ambientais dos métodos de fabricação digital, particularmente quando aplicados a geometrias complexas de paredes de concreto. Um estudo de caso de um processo robótico que é aplicado a uma parede de concreto foi executado com a metodologia ACV. Os resultados da avaliação demonstraram que a fabricação digital proporciona benefícios ambientais quando aplicada a estruturas complexas. Os resultados também confirmam que a complexidade adicional é alcançada através da fabricação digital sem custos ambientais adicionais. Este estudo fornece um argumento quantitativo para posicionar a fabricação digital no início de uma nova era, que é muitas vezes chamada de Idade Digital em muitas outras disciplinas.

Tem-se ainda os trabalhos de Pedroso (2015), Castro (2013) e Campos e Paiva (2013) que tratam da avaliação do ciclo de vida de paredes de concreto, mas somente no que se refere à energia incorporada. Além desses, há o estudo de Tavares (2006), que avaliou energia incorporada e emissão de CO₂, e tornou-se referência para diversos estudos de ACV posteriores.

Braga, Lira e Sposto (2017) avaliaram as emissões de CO₂ de paredes de concreto, numa avaliação do berço ao túmulo, verificando que a etapa de operação é a maior responsável pelas emissões de CO₂, seguido pela fase de pré-uso, principalmente no que se refere à extração e ao processamento dos materiais.

Sabendo da necessidade de avaliar o desempenho ambiental dos sistemas construtivos, ainda se verifica a presença de dificuldades no desenvolvimento desses estudos, identificada pelos recortes que são feitos tanto na definição do escopo, quanto na profundidade da análise. Assim, existe uma lacuna nos estudos sobre ACV em paredes de concreto, principalmente em

se tratando de uma avaliação do berço ao túmulo, sendo de extrema relevância o estudo de potencial de aquecimento global, que inclui a emissão de diversos outros gases de efeito estufa além do dióxido de carbono.

2.11 DESEMPENHO TÉRMICO E CONSUMO ENERGÉTICO NA FASE OPERACIONAL DE EDIFICAÇÕES

A ABNT NBR 15575-4: 2013, recomenda um desempenho térmico mínimo nas vedações e cobertura de qualquer tipo de edificação incluindo as HIS. Isto significa que estas devem satisfazer a exigência mínima de habitabilidade. Há uma orientação sobre o desempenho de edificações habitacionais, apresentando-se, na parte 4, os requisitos para os sistemas de vedação vertical interna e externa (SVVIE). Desta forma, além de avaliar os potenciais impactos nas várias fases do ciclo de vida, deve-se considerar que as vedações possuam um desempenho térmico mínimo (PALACIO, 2013).

De acordo com a lei de transferência de calor, o fluxo de calor através de uma parede depende da diferença de temperatura entre os ambientes externos e internos, da condutividade térmica do material de construção e da espessura da parede. Todos esses parâmetros formam a base para caracterizar o desempenho térmico de um edifício (ZHOU; WONG; LAU, 2014).

Para cumprir as exigências atuais dos usuários, a demanda por edifícios com iluminação de melhor qualidade e sistema de condicionamento de ar é crescente. Para tanto, se faz necessário o provimento suficiente de energia para seu funcionamento, visto que há ainda os demais sistemas a serem supridos, como uso de microcomputadores e outros equipamentos de informática, sistema de automação do edifício, como elevadores e equipamentos de segurança, e demais itens de uso doméstico. Destes sistemas prediais, o que mais consome energia é o sistema de climatização, necessário para manter os ambientes térmicos de acordo com as atividades exercidas no local, de forma que as condições internas atendam às necessidades dos usuários (SUZUKI, 2010).

O consumo energético e os potenciais impactos ambientais apresentados durante a vida útil de uma edificação estão diretamente relacionados ao seu desempenho térmico e ao conforto térmico do usuário. Uma vez havendo desconforto térmico em uma edificação, o usuário tenderá a utilizar equipamentos de resfriamento e/ou aquecimento. Segundo Maciel (2013), para amenizar essa necessidade de condicionamento ambiental é necessário que a edificação

mantenha níveis mínimos de desempenho térmico, sendo a envoltória a principal responsável por isso.

O sistema de ar condicionado tornou-se um componente importante para fornecer um ambiente interior termicamente confortável para os usuários, mas é acompanhado de várias preocupações ambientais e energéticas, incluindo o aquecimento global e o elevado consumo de energia.

Em regiões de elevada temperatura, o ar exterior pode superar 35 °C no verão. As superfícies externas das envoltórias da edificação, incluindo o telhado e as superfícies externas da parede, podem atingir 60 °C ou mais se estiverem expostas à luz solar direta. Dessa forma, é possível uma diferença de temperatura de 35 °C entre a superfície externa da edificação e seu interior caso a temperatura interna projetada for de 25 °C, mantida por um sistema de ar condicionado. Conseqüentemente, é necessária uma grande quantidade de energia elétrica pelo sistema de ar condicionado para manter a temperatura interna requerida (ZHOU; WONG; LAU, 2014).

A fim de reduzir o consumo de eletricidade pelo sistema de ar condicionado, bem como a mitigação de impactos ambientais, as características e propriedades de transmitância térmica e condutividade térmica da envoltória são essenciais, pois determinam a transferência de calor entre os ambientes externos e internos. Desse modo, é importante avaliar o desempenho dos sistemas construtivos disponíveis para balizar escolhas tecnicamente mais sustentáveis a depender da região onde a edificação será construída.

Segundo Buoro (2006), há uma gama de *softwares* de simulação do comportamento térmico de edifícios à disposição dos projetistas. Cada *software* utiliza modelos matemáticos próprios para simularem trocas térmicas ou mesmo para fazer o balanço energético global de cada ambiente. Os programas de simulação são ferramentas importantes de auxílio ao projeto, e permitem a escolha de alternativas mais adequadas que garantam um melhor desempenho energético, como a orientação, o tipo de proteção solar mais adequada e até mesmo a composição dos materiais das paredes e da cobertura.

2.11.1 *DesignBuilder*

Existem diversos *softwares* de simulação de desempenho térmico no mercado atual, dentre eles o *DesignBuilder*. O *DesignBuilder* apresenta uma interface gráfica com maior facilidade de utilização, que é integrada ao *software EnergyPlus*, ferramenta desenvolvida pelo Departamento de Energia dos EUA para quantificar o consumo energético de sistemas de resfriamento e aquecimento, e é o *software* utilizado pelo Procel Edifica⁵ e por laboratórios credenciados no Brasil.

É um *software* que trabalha com modelagem de edifícios e simulação de desempenho ambiental combinando rápida modelagem e interface amigável. É a primeira interface de modelagem amigável a ser combinada com as ferramentas de simulação térmica do *EnergyPlus* (DESIGNBUILDER, 2018).

O *EnergyPlus* é o programa mais utilizado nos Estados Unidos e mais difundido no mundo, e é resultado da junção de dois outros *softwares*, o DOE-2 e o BLAST (BUORO, 2006). É um programa de simulação para engenheiros, arquitetos e pesquisadores, que visa modelar o uso de energia e água em edificações. Permite simular sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação, entre outros fluxos de energia e uso da água nas edificações. Dessa forma, o profissional pode melhorar o *design* de forma a gastar menos água e energia a partir das simulações de desempenho de uma edificação. Não possui interface amigável, mas atua em conjunto com outros *softwares* (ENERGYPLUS, 2018; MACIEL, 2013).

A partir dos conceitos explorados neste capítulo, no item a seguir descreve-se a metodologia adotada para essa pesquisa, com base das definições da avaliação do ciclo de vida, a fim de responder aos objetivos propostos.

⁵ Procel Edifica é um programa instituído em 2003 pela ELETROBRAS, que promove o uso racional da energia elétrica em edificações, e incentiva a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente (PROCEL, 2006).

3 MÉTODO

A fim de atingir os objetivos propostos para esta pesquisa, definiram-se etapas necessárias ao seu desenvolvimento, considerando os conceitos e as metodologias da ferramenta ACV.

Apresentam-se aqui as premissas consideradas para a ACV, iniciando pela definição do objetivo e do escopo, com a exposição da unidade funcional e demais itens necessários ao estudo.

O projeto do empreendimento definido como base para a análise comparativa entre sistemas de vedação vertical é aqui apresentado, bem como os meios de composição dos dados de inventário, ferramentas que servirão de base para a avaliação de impacto e formas de interpretação dos resultados.

Foram definidas etapas da ACVCO₂-eq de acordo com os conceitos e metodologias de ACV, conforme apresentado na Figura 6, considerando o estudo de GEE no que tange ao potencial de aquecimento global.

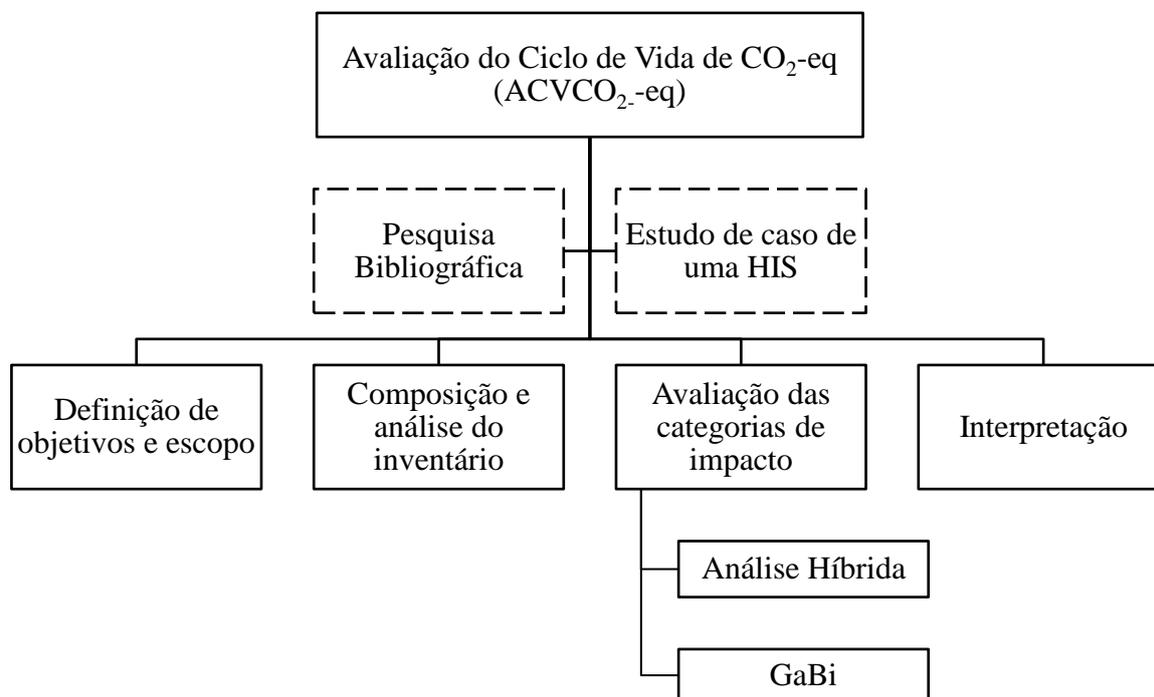


Figura 6: Etapas da metodologia adotada.

3.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS E ESCOPO

O objetivo da aplicação da ACVCO₂-eq nesta pesquisa é avaliar o desempenho ambiental do sistema de vedação com função estrutural de paredes de concreto (PC) e compará-lo com o sistema de vedação convencional (VC) constituído por blocos cerâmicos de vedação e estrutura de pilares e vigas de concreto armado, a partir dos resultados de potencial de aquecimento global.

As Figuras 7 e 8 apresentam uma representação tridimensional dos sistemas de PC e VC escolhidos para esta pesquisa, a fim de ilustrar melhor a composição de cada um deles.



Figura 7: Detalhe e corte da vedação em parede de concreto.

Fonte: Pedroso, 2015

Conforme se observa na Figura 8, o sistema de vedação convencional em blocos cerâmicos apresenta maior número de componentes, o que leva a uma maior complexidade na busca de dados relativos à ACV.

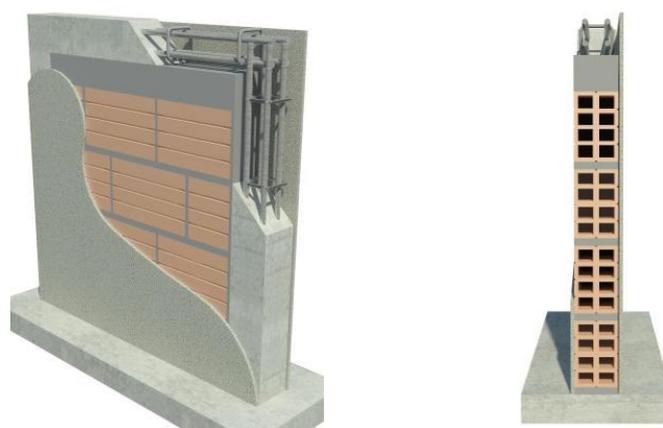


Figura 8: Detalhe e corte da vedação convencional.

Fonte: Pedroso, 2015

3.1.1 Caracterização da unidade habitacional

Para a aplicação da ACVCO₂-eq, foi considerado o projeto de uma habitação de interesse social como estudo de caso (Figura 9), sobre o qual serão analisados os dois sistemas construtivos mencionados.



Figura 9: Perspectiva do projeto padrão adotado.

Fonte: Pedroso, 2015.

O projeto adotado possui área de 45,64 m², conforme pode ser observado na Figura 10, e é composto por dois quartos, uma sala, uma cozinha, um banheiro e uma pequena área de serviço na parte externa. Possui cinco janelas, duas portas externas e três portas internas, e foi desenvolvido conforme conjunto de especificações mínimas da CAIXA (2011), principal instituição financeira do PMCMV. Foi definida uma vida útil de 50 anos para ambos os sistemas conforme recomendado pela ABNT NBR 15575: 2013.

O projeto foi escolhido por se tratar de uma edificação unifamiliar representativa para o cenário de HIS no Brasil e por já ter sido utilizado em estudos anteriores: Pedroso (2015) no levantamento da energia incorporada de sistemas de parede de concreto e outros sistemas de vedação vertical (SVV), Caldas (2016) no estudo de energia e emissões de CO₂ para o sistema *light steel framing*, Caldeira (2016) no estudo de energia em telhas termoacústicas, e Lira (2017) no estudo de depleção abiótica e potencial de aquecimento global de telhados verdes.

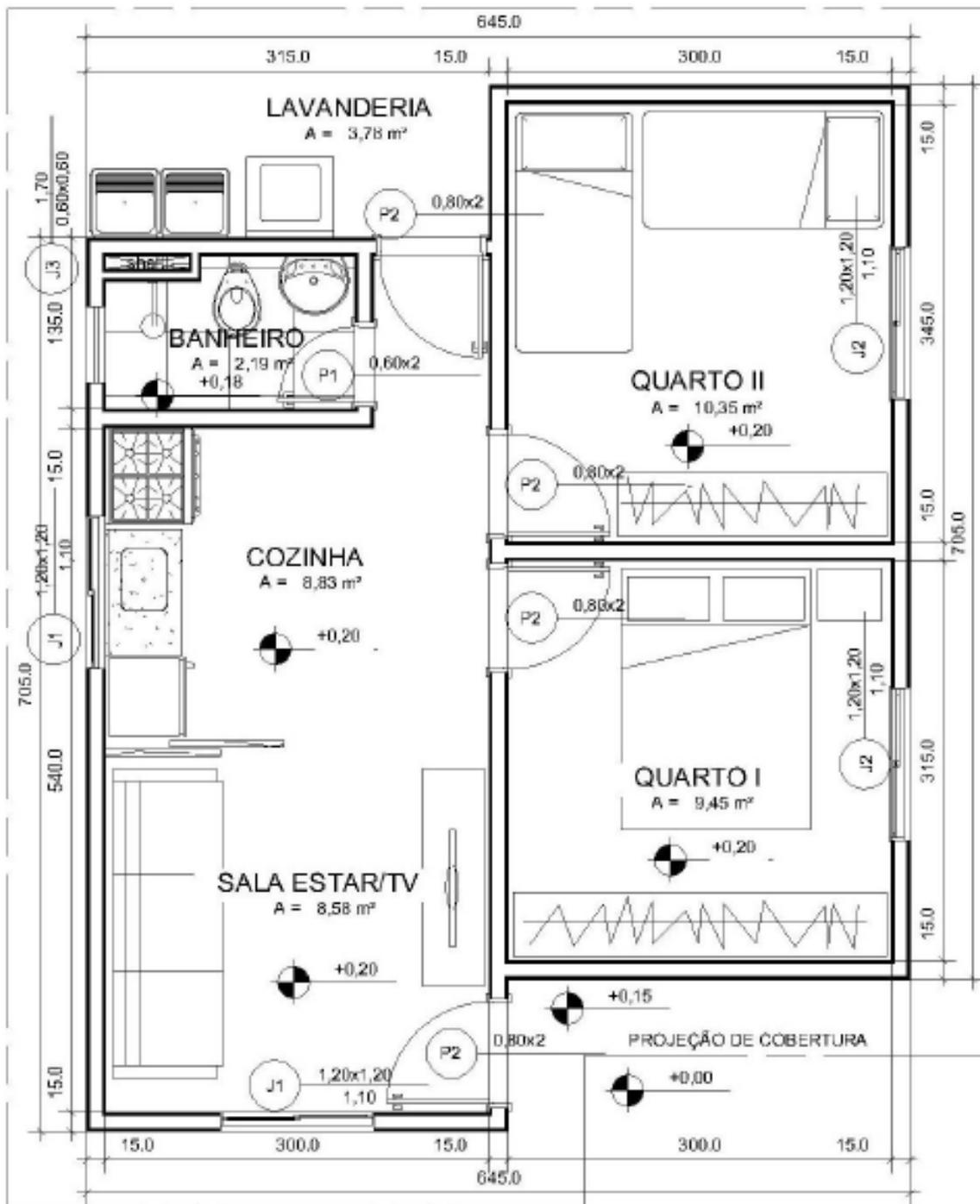


Figura 10: Projeto de habitação de interesse social estudado.

Fonte: Pedrosa (2015).

A Figura 11 apresenta ilustrações das fachadas da habitação, e a Figura 12 dos cortes. Observa-se que se trata de uma habitação de dimensões reduzidas e, portanto, condizentes com a tipologia referente ao programa habitacional brasileiro.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11: Fachadas da habitação. a) principal; b) posterior; c) lateral direita; d) lateral esquerda.

Fonte: Pedroso, 2015.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 12: Cortes da habitação. a) Sem a cobertura; b) Corte a 1,20 m de altura em planta baixa; c) Longitudinal; d) Transversal.

Fonte: Pedroso, 2015.

As variáveis do estudo estão concentradas na comparação de um sistema de vedação em paredes de concreto armado com um sistema de vedação em blocos cerâmicos e estrutura de pilares e vigas de concreto armado, utilizado comumente em habitações brasileiras. Para os dois sistemas, foi analisada a categoria de impacto potencial de aquecimento global (emissões de CO₂-eq), conforme Figura 13.

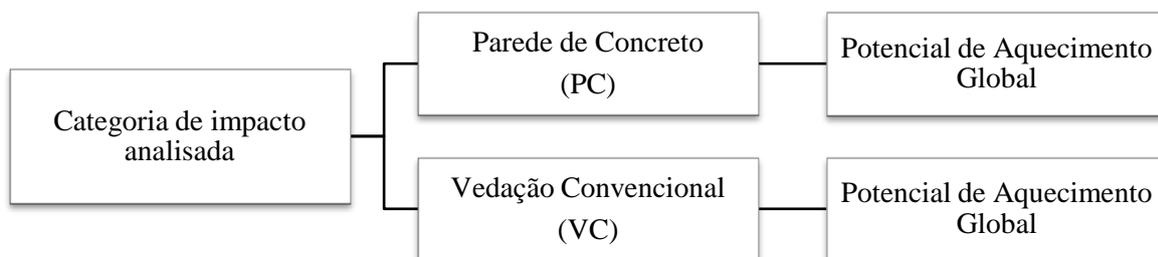


Figura 13: Categorias de impacto analisadas.

Como o fim do estudo é a comparação dos sistemas construtivos, foi considerada somente a diferença entre as vedações verticais, e desta forma, estes sistemas são as únicas variáveis. Na Tabela 5 são apresentadas as características das vedações avaliadas nesta pesquisa, e os materiais que as constituem.

Tabela 5: Itens avaliados para cada sistema.

Sistema de Vedação	Descrição	Materiais
PC	Composto por paredes contendo concreto e duas camadas de tela soldada.	Concreto, tela, espaçadores, fôrmas.
VC	Paredes compostas por blocos cerâmicos, duas camadas de chapisco e duas camadas de reboco.	Bloco cerâmico, cimento, areia, cal, concreto, aço, madeira.

3.1.2 Fases da avaliação do ciclo de vida

A EN 15804: 2013 apresenta uma série de etapas compreendidas em uma ACV, porém nem todas serão abordadas nessa pesquisa (a análise foi limitada, conforme item 1.4), devido a sua complexidade. A fronteira da ACV em relação às fases consideradas é apresentada na Figura 14, sendo que somente as etapas em negrito foram abordadas nesta pesquisa.

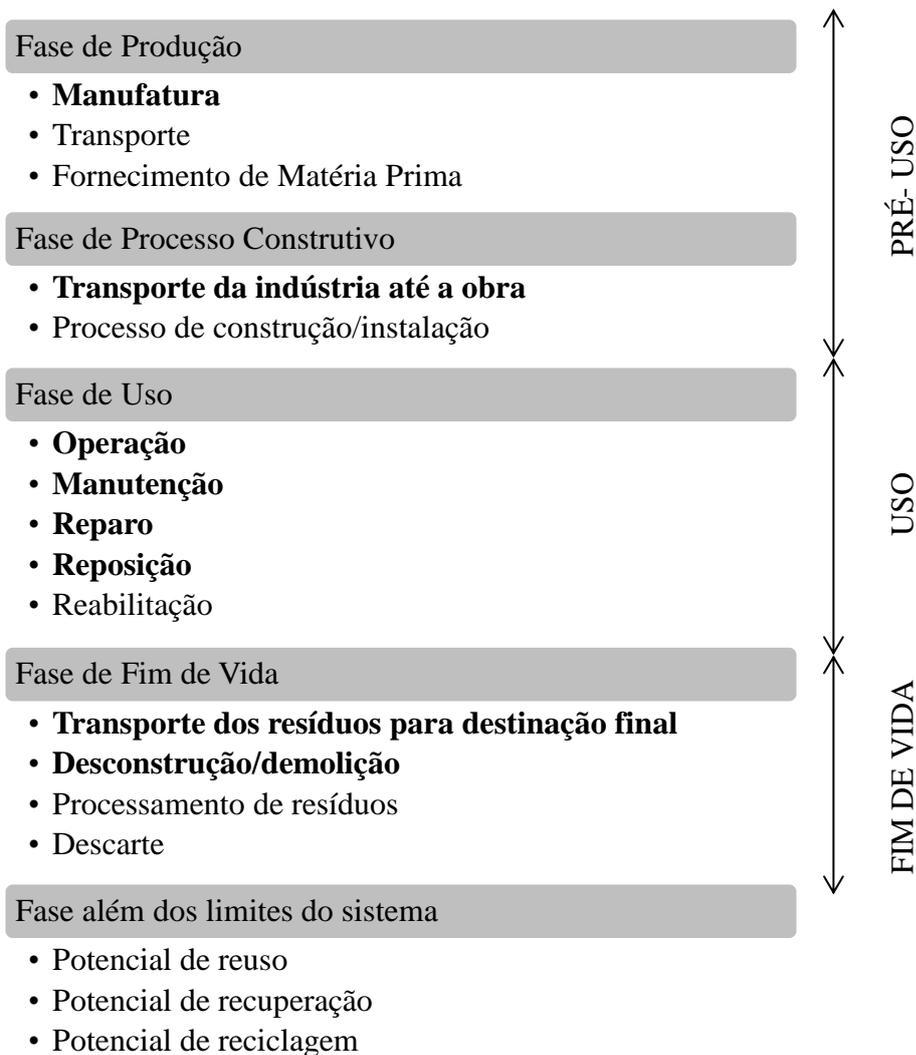


Figura 14: Fronteiras da ACV em relação às fases abordadas.

Para a quantificação dos impactos potenciais de aquecimento global, foi realizado um recorte da avaliação do ciclo de vida (ACV), aplicada a sistemas de vedação vertical interno e externo (SVVIE) de uma HIS, do berço ao túmulo, tendo como função a vedação vertical e como unidade funcional o metro quadrado (m²) de área de parede. Foram consideradas as fases de pré-uso, uso e fim de vida, divididas em etapas, conforme exemplificado na Figura 15.

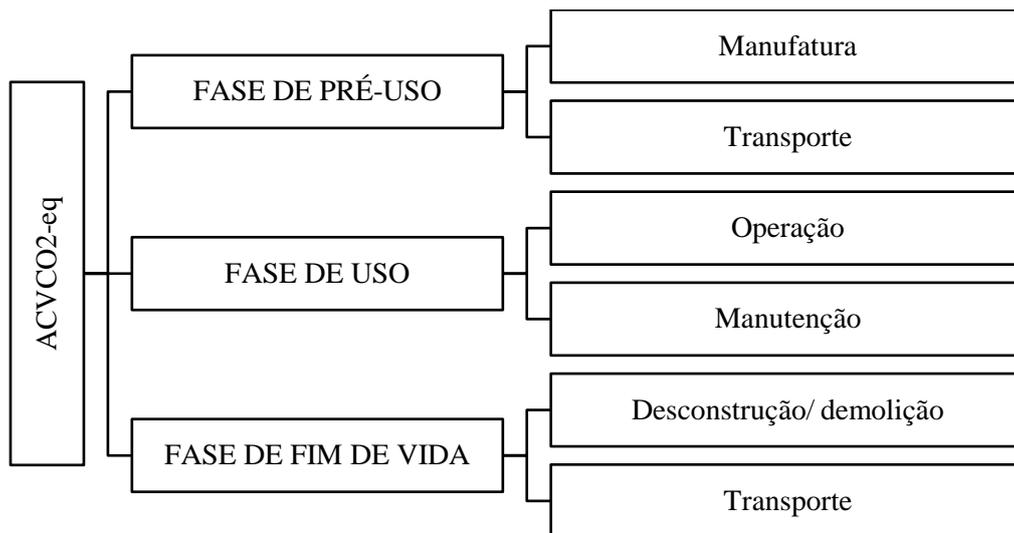


Figura 15: Variáveis consideradas neste estudo.

Dentro de cada fase, foram definidas etapas, e para cada uma delas, foi dada uma nomenclatura e uma sigla a fim de facilitar a apresentação de dados e resultados na pesquisa. Cada etapa compreende uma série de considerações e sub-etapas que as caracterizam. A fim de tornar claro o que de fato está sendo avaliado ao se tratar de cada uma das etapas, são apresentadas algumas informações na Tabela 6.

Tabela 6: Nomenclaturas e siglas das etapas adotadas para a ACV.

Fase	Descrição	Nomenclatura	Sigla
Pré-Uso	Manufatura (extração e processamento de matérias-primas)	Etapa de Produção	EP
	Transporte do ponto fabril ao local da obra	Etapa de Transporte Inicial	ETi
Uso	Operação (consumo energético de condicionamento artificial e iluminação na etapa operacional)	Etapa Operacional	EO
	Manutenção (reparos devido à vida útil dos elementos constituintes)	Etapa de Manutenção	EM
Fim de Vida	Demolição e/ou desconstrução	Etapa de Desconstrução	ED
	Transporte para aterro dos resíduos gerados pela demolição e/ou desconstrução dos sistemas	Etapa de Transporte Final	ETf

3.1.3 Localização

Como local para o estudo, escolheu-se a cidade de Brasília, localizada no Distrito Federal, a fim de subsidiar o levantamento de distâncias de transporte nas fases de pré-uso (envolve a produção, o transporte de materiais e a etapa de construção) e fim de vida (inclui demolição/desconstrução e transporte dos resíduos para a disposição final), e de fornecer parâmetros a respeito das condições climáticas para as simulações da fase de uso. O local hipotético de construção da habitação é a Universidade de Brasília, no Distrito Federal, conforme ilustrado na Figura 16.



Figura 16: Localização hipotética da obra.

Fonte: Adaptado de *Google Maps*.

3.1.4 Zona bioclimática

Para a etapa de operação serão considerados os dados climáticos referentes à Brasília, que está inserida na zona bioclimática 4, conforme a ABNT NBR 15220-3: 2005.

3.1.5 Unidade funcional

Como unidade funcional foi definido 1 (um) metro quadrado (m^2) construído de parede, que é comum aos dois sistemas. Assim, os resultados serão apresentados em função desta unidade, que é de $126,75 m^2$ de parede.

3.1.6 Fronteiras do sistema

Somente os itens que diferem entre os sistemas PC e VC foram quantificados. Os itens comuns aos dois sistemas construtivos foram desconsiderados, tais como fundação, cobertura, revestimentos cerâmicos, pintura, esquadrias, uso de equipamentos (como computadores e chuveiros) e cocção. Esquadrias, mobília e louças sanitárias não foram contabilizadas por também se tratarem de itens comuns aos dois sistemas. A avaliação foi realizada do berço ao túmulo, porém algumas etapas não foram consideradas, como a etapa de execução.

Em relação à pintura, foi considerado para ambos os sistemas que estes estejam com a superfície regularizada para receber a aplicação da tinta. No caso do sistema de PC, considerou-se que o mesmo está com a superfície lisa após a desforma, não sendo necessária a aplicação de reboco. Para o sistema de VC, a superfície necessita de regularização, por isso, considerou-se a aplicação de chapisco e reboco.

O tipo de tinta aplicada diretamente sobre a superfície do concreto no sistema PC pode diferir da que é comumente utilizada no sistema VC. Entretanto, devido à indisponibilidade de dados para os variados tipos de tintas existentes no mercado, foi considerado um único tipo para aplicação nos sistemas, e, portanto, não contabilizado no estudo.

O *software GaBi* escolhido para realizar parte da metodologia não foi utilizado em sua versão profissional, devido a indisponibilidade, portanto foi utilizada sua versão educacional gratuita, cuja base de dados é menos abrangente e completa.

Os fatores de emissão de CO₂-eq para a análise híbrida foram obtidos de dados da literatura e de Declarações Ambientais de Produtos (DAP), buscando-se encontrar processos e características que se assemelhem aos brasileiros, não necessariamente idênticos.

Para a fase de operação, simulada no *software DesignBuilder*, considerou-se apenas os dados referentes à Brasília-DF, incluída na zona bioclimática 4. O desempenho térmico dos sistemas foi avaliado considerando o gasto energético com equipamento de condicionamento ambiental (do tipo “*Split no fresh air*”), mediante uso de iluminação e ocupação do ambiente.

Não foi considerado o transporte de operários, nem o transporte de materiais dentro do próprio canteiro de obras. O gasto energético com equipamentos na etapa de construção também não foi levantado, por não ser representativo diante dos demais impactos, como verificado em Lira (2017) e Souza *et al.* (2016).

3.2 COMPOSIÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO

Nessa etapa, descreve-se a maneira como foi composto o inventário de dados, com base no escopo e no objetivo definidos anteriormente.

Antes de proceder ao levantamento de dados, foi necessário definir a espessura e composição das paredes nos dois sistemas construtivos considerados. Conforme a ABNT NBR 15220-3: 2005, Brasília está inserida na zona bioclimática 4 (ZB4). Para atender aos requisitos de desempenho térmico constantes na norma ABNT NBR 15575-4: 2013, para a zona bioclimática em questão, os SVV devem apresentar as seguintes características⁶:

- Transmitância térmica (U) menor ou igual $3,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$;
- Capacidade térmica (CT) superior a $130 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$, considerando que a superfície apresente cores claras ou médias (com absorvância inferior a 0,6).

Para o sistema de paredes de concreto (PC), foi calculada uma espessura de 17,5 cm devido aos requisitos de desempenho térmico, apesar da recorrência no uso de paredes com 10 cm na região de Brasília. No sistema de vedação convencional (VC), foi calculada uma espessura final (com revestimentos) de 15 cm. Os valores da espessura foram calculados com base nos procedimentos da ABNT NBR 15220: 2003. Os dados referentes a U e CT calculados para os sistemas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos sistemas VC e PC.

Sistema	Espessura	U ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)	CT ($\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$)
PC	17,5	3,7	420
VC	15	2,38	158

Assim, o sistema PC terá 17,5 cm de espessura contendo concreto de 25 MPa, e duas camadas de tela soldada, visto que, conforme a ABNT NBR 16055: 2012 paredes com espessura superior a 15 cm devem ser construídas com duas telas.

O sistema VC terá 15 cm de espessura, com blocos cerâmicos de 8 furos com 9 cm de espessura, duas camadas de chapisco com 2,0 cm e duas camadas de reboco paulista de 1,0 cm, a fim de que os dois sistemas apresentem superfície acabada, além da estrutura

⁶ A ABNT NBR 15220: 2003 apresenta os conceitos de Transmitância térmica (U) e Capacidade térmica (CT). 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 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. 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 $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

constituída de pilares e vigas de concreto armado de 25 MPa. O traço utilizado para a argamassa de assentamento e do chapisco foi 1:3 (cimento e areia), e o traço do reboco foi de 1:2:8 (cimento, cal e areia), ambos encontrados nas composições do SINAPI para Brasília.

3.2.1 Fase de pré-uso

O primeiro passo na construção do inventário foi realizar o levantamento de todos os insumos necessários à construção de cada sistema construtivo. A coleta de dados foi feita a partir do levantamento das quantidades dos materiais envolvidos na execução dos sistemas, considerando os percentuais de perdas, que foram determinadas de acordo com dados provenientes da literatura científica e do fabricante. Os percentuais de perda considerados encontram-se nos Apêndices C e D.

Para o levantamento dos materiais e componentes foram consultadas as tabelas de composições de materiais. Deu-se prioridade para as composições do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), visto que elas são gratuitas e estão disponíveis para o acesso.

Além disso, o projeto adotado foi concebido dentro dos padrões estabelecidos pela Caixa Econômica Federal, e de acordo com o Decreto nº 7893 (BRASIL, 2013), os orçamentos de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, devem ser obtidos a partir das composições do SINAPI.

Para o sistema de parede de concreto, foram levantados os dados referentes aos três tipos de fôrmas (de alumínio, de plástico e metálica com compensado plastificado). As quantidades relativas a elas foram obtidas dividindo-se a massa de fôrma por m² pelo número de utilizações potenciais de cada tipo, sendo 1000 utilizações para a fôrma de alumínio, 100 utilizações para a fôrma plástica e 50 utilizações para a fôrma mista, conforme dados de fabricantes apresentados por Faria (2009). A divisão fez-se necessária para obter o percentual do uso de cada forma que é relativo a uma única habitação, como foi considerado nesse estudo, mesmo que as características do sistema de parede de concreto sejam viáveis para construção em escala.

Para o sistema convencional, foi considerado somente o uso de madeirite como tipo de fôrma, visto que é o mais usual. Há uma maior limitação no uso dessas fôrmas para o sistema com

vedação convencional, visto que é utilizado em pilares, vigas e laje, que configuram uma área menor que as paredes. Em geral, há um menor cuidado com as fôrmas de madeirite na obra, são feitos muitos recortes e não há uma padronização como no sistema de paredes de concreto. Por essa razão, foi considerada nesse caso, apenas uma utilização.

Para o levantamento de distâncias de transporte, necessárias para verificar os potenciais impactos nessa etapa, foram consideradas as distâncias das fábricas de produção dos materiais até o canteiro de obras, onde a unidade habitacional está localizada. A seleção das fábricas dos materiais e componentes utilizados teve como base a lista de empresas em conformidade com os Programas Setoriais de Qualidade (PSQ), que estão inseridas no PBQP-h para os materiais e componentes que possuem PSQ.

A conformidade com os Programas Setoriais de Qualidade também está contida na lista de requisitos dos programas de certificações ambientais de edificações, como LEED, AQUA e Selo Caixa Azul, o que motivou a escolha por esse critério. Os dados referentes às fábricas foram tabulados em planilha eletrônica (Excel) e foram calculadas as distâncias por meio do *Google Maps*, adotando-se a fábrica que estivesse à menor distância da localização da obra.

Um esquema ilustrativo do sistema de parede de concreto, objeto da pesquisa, pode ser visualizado na Figura 17. Observam-se, neste caso, vários materiais e peças que estão contidos no sistema de fôrmas.

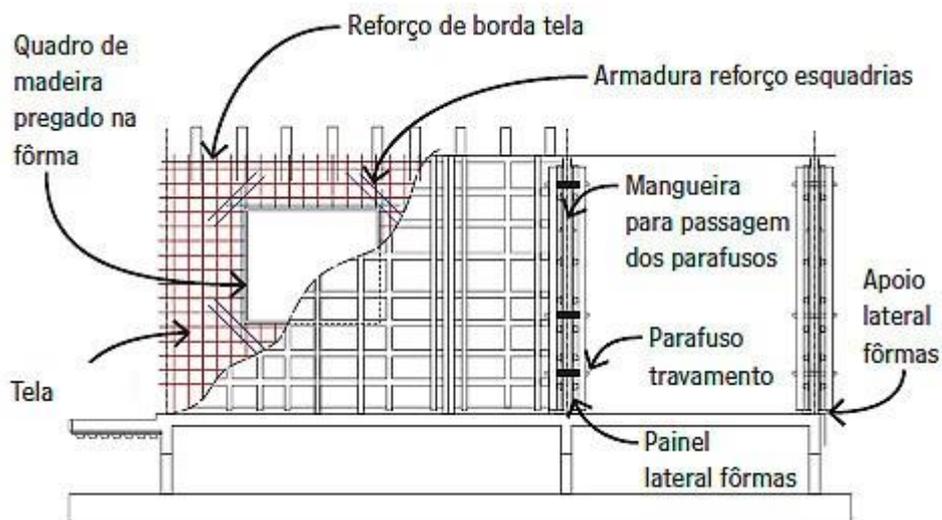


Figura 17: Sistema de parede de concreto utilizado na pesquisa.

Fonte: SILVA, 2011.

Para o cálculo de cada categoria de impacto, faz-se necessária a inclusão dos valores em massa ou volume de cada dado de entrada (*input*), que representam os materiais e a energia que entram no processo. As Figuras 18 e 19 apresentam os fluxos de *inputs* de cada um dos sistemas, sendo que para ambos, os *outputs* serão emissões de GEE, resíduos sólidos da construção e o produto final acabado.

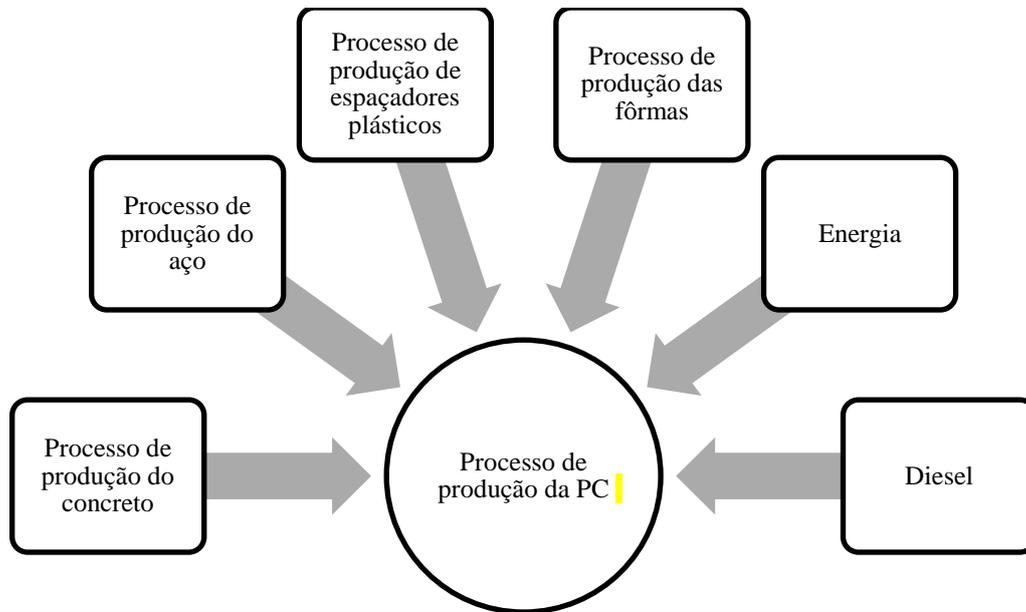


Figura 18: Fluxo de *inputs* do sistema de parede de concreto.

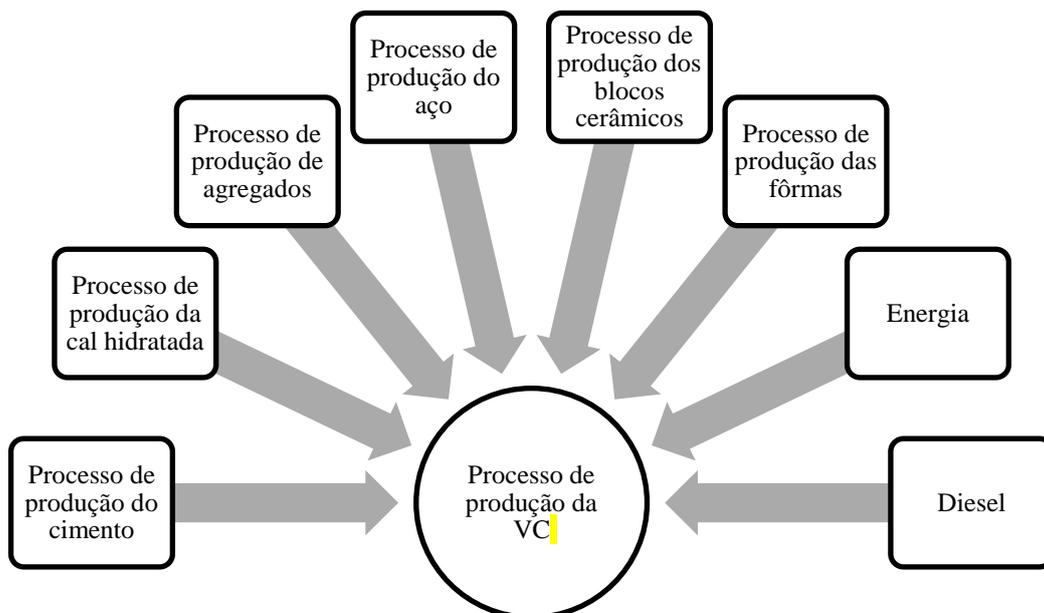


Figura 19: Fluxo de *inputs* do sistema de vedação convencional.

3.2.2 Fase de uso

A fase de uso foi dividida em duas etapas: manutenção e operação. Para a etapa de operação foi adotada a simulação computacional a fim de quantificar o consumo energético proveniente do uso de equipamentos para condicionamento artificial e de iluminação, e posterior fornecimento destes dados para estimar os potenciais impactos ambientais para cada sistema considerado. Dessa forma, foram realizadas simulações para os sistemas PC e VC por meio do *software DesignBuilder 5.0*, do *EnergyPlus* – indicado pela ABNT NBR 15575-1: 2013 e pelo Procel Edifica.

A diferença do tipo de vedação vertical entre os dois sistemas acarreta em uma maior ou menor necessidade do uso de aparelhos de condicionamento artificial, já que os materiais e componentes que compõem essas vedações apresentam diferentes propriedades térmicas. Portanto, foi avaliado o consumo energético devido ao condicionamento artificial (AC), que será diferenciado devido às características de transmitância e capacidade térmica de cada um dos sistemas. As simulações foram realizadas em três cenários distintos: com apenas iluminação artificial (IA), com apenas aparelho de condicionamento ambiental (AC), e com ambos ligados (IA+AC), verificando a influência das lâmpadas na necessidade de condicionamento, por provocar a elevação da temperatura no interior dos ambientes.

O tipo de lâmpada utilizado foi o padrão fornecido pelo *software*, assim como os vidros das janelas e a cobertura. Não foi considerado o uso de demais equipamentos e eletrodomésticos, por se tratarem de itens comuns às duas tipologias.

No *DesignBuilder* não existem ferramentas que permitam modelar os sistemas heterogêneos de vedação, tais como os blocos cerâmicos. Esse material apresenta camadas de ar que se intercalam com a camada maciça do material, que difere de um elemento homogêneo, o qual é representado por uma placa homogênea constituída por um único material (ABNT NBR 15220, 2005). Para que haja equivalência entre o sistema estudado e o sistema inserido no *DesignBuilder*, a espessura apresentada na Tabela 7 foi variada automaticamente no *software* ao se fixar o valor da transmitância térmica, recurso disponível no programa.

Os dados climáticos utilizados foram os arquivos do INMET do tipo TMY, disponibilizados pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE - UFSC) para a cidade de Brasília (ZB4). Como parâmetro para as simulações foi considerado uma agenda “cheia”, ou seja, o AC pode ser acionado em qualquer período do dia ou da noite quando a temperatura

no interior do ambiente supera uma temperatura limite de 24,3°C, na qual se considera que há sensação de conforto térmico. Essa temperatura foi obtida a partir da equação desenvolvida por Aluciems (1981) *apud* Pereira e Assis (2010): $TN = 17,6 + 0,314T$, em que T é a temperatura média do ar mensal externa (em °C), mesma equação utilizada por Caldas (2016).

Foi admitido o uso de um aparelho de ar-condicionado tipo “*Split no fresh air*”, utilizando o perfil “Apartamento *Cooling*”, por ser um dos modelos mais simples existentes no mercado e disponível na base de dados do *software DesignBuilder*. Foi considerada a eficiência do aparelho (CoP) de 2,80, que corresponde ao valor mínimo de eficiência para aparelhos com Selo Procel C (PROCEL, 2015). Foi adotado o selo Procel nível C (mínimo) pelo fato da HIS 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).

Optou-se por colocar apenas um aparelho de condicionamento na sala de estar, pois como foi avaliado por Caldas (2016), este cenário apresentou maior diferença entre os apresentados pelo autor. A ocupação considerada na simulação foi de quatro pessoas, levando a uma densidade habitacional de 0,09 pessoas/m².

Já a etapa de manutenção refere-se aos reparos e reposição de materiais que possuem vida útil inferior a vida útil da edificação, que é de 50 anos. Dessa forma, a manutenção foi calculada separadamente, considerando fatores de reposição (FR) iguais a 1 (um) para elementos com mesma vida útil da estrutura, e para os demais, será uma relação entre a vida útil do elemento e a vida útil total do sistema.

Os itens com vida útil inferior a da edificação são o chapisco e o reboco paulista no sistema de VC, que possuem vida útil de 40 anos – dado obtido da ABNT NBR 15575-1: 2013 – e apresentam FR=0,25. No sistema de PC todos os elementos considerados possuem a mesma vida útil da edificação, e, portanto, não possuem reposição dentro da vida útil considerada.

3.2.3 Fase de fim de vida

As emissões referentes à demolição foram calculadas a partir dos resultados para quantificação da energia incorporada (EI) na demolição de PCs obtidos por Pedroso (2015) por meio de ensaios experimentais. Com os dados referentes ao volume construído e demolido apresentados por este autor, foram obtidos fatores de correção de volume (FCV)

para os sistemas de PC e VC, conforme apresentado na Tabela 8, a serem multiplicados pelos volumes iniciais de 1 m² construído com suas respectivas espessuras, obtendo-se um volume desconstruído hipotético para os cálculos referentes a esta etapa do ciclo de vida.

Tabela 8: Dados para a obtenção de fatores de correção de volume (FCV).

Sistema	Volume construído (PEDROSO, 2015)	Volume desconstruído (PEDROSO, 2015)	Fator de correção de volume (FCV)
PC	0,1	0,18	1,8
VC	0,155	0,23	1,48

A partir do volume demolido calculado para as paredes de concreto, foi obtida a energia incorporada por meio de uma correlação com os valores de EI apresentados por Pedroso (2015) a partir dos ensaios realizados. O gasto energético nessa fase deve-se ao uso de equipamentos necessários à demolição que consomem eletricidade. A contabilização referente ao transporte de resíduos à destinação final foi realizada do mesmo modo que na fase de pré-uso, de modo que é considerada a distância da localização da obra até o aterro mais próximo na cidade.

A partir dessas especificações, foi possível obter uma avaliação acerca do desempenho ambiental, no que se refere ao potencial de aquecimento global, verificando comparativamente os impactos dos sistemas de PC e VC, e respondendo as questões definidas nos objetivos.

3.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

Para este estudo, devido à dificuldade com a utilização de uma base de dados profissional no *software GaBi*, foi necessário utilizar a base de dados educacional. Por ser uma base de dados com menor abrangência, optou-se por fazer a análise também com dados obtidos de declarações ambientais de produto (DAP) e dados da literatura, configurando uma análise híbrida.

Dessa forma, a conversão dos dados de entrada em potencial de aquecimento global foi feita de duas formas: utilizado o *software GaBi* versão educacional (aplicando o método CML 2001, cuja abordagem é *midpoint*), e utilizando os dados disponíveis em DAP's, estudos e artigos (análise híbrida). Optou-se por analisar nesse estudo somente o potencial de

aquecimento global (CO₂-eq), que é classificado como uma categoria de impacto sobre a saúde humana.

3.3.1 Avaliação pela Análise híbrida

A obtenção das emissões de GEE em kgCO₂-eq foi realizada multiplicando as quantidades de cada material (massa ou volume), quantidade de energia (MJ) e litros de diesel, por fatores de emissão de CO₂-eq (FCO₂-eq), que foram obtidos em Declarações Ambientais de Produto (DAP's), artigos, ou através de dados oficiais do Balanço Energético Nacional.

Os fatores de emissão de CO₂-eq dos materiais envolvidos na produção de cada um dos sistemas construtivos foram adotados preferencialmente de DAP's. Sua escolha foi feita com base nos métodos de fabricação apresentados no escopo de cada um dos sistemas, PC ou VC, escolhendo-se aqueles que mais se assemelham ao processo de produção brasileiro, quando possível. Assim, os DAP's utilizados são de regiões distintas. Quando não encontrados processos de produção semelhantes à prática brasileira, foram adotados os fatores de emissão de CO₂-eq apresentados na pesquisa de Saade (2014), que apresentou dados de emissão de GEE para uma série materiais de construção no contexto brasileiro.

Dessas fontes, obteve-se a quantidade de CO₂-eq por unidade funcional de cada componente constituinte de ambos os sistemas. Porém, para as etapas de operação, demolição e transporte, foi necessário converter os valores de energia e de quantidade de diesel em CO₂-eq.

Para o cálculo de emissões de CO₂-eq nas etapas de transporte, foi utilizado um consumo médio de diesel de 0,0136 L/T.km, fator apresentado por Nabut Neto (2011). Considerou-se que o fator de emissão de GEE do diesel é de 2,056 kgCO₂-eq/L. Esse fator foi calculado com base nos dados de consumo energético e emissões de GEE para o setor de transportes do Brasil, que se encontram disponíveis no Balanço Energético Nacional de ano base 2016 (BRASIL, 2017), e reproduzidos na Tabela 9.

Tabela 9: Dados de emissões de GEE e consumo energético no setor de transportes no ano de 2016.

Emissões de GEE no setor de transportes	Consumo energético no setor de transportes
194,3 Mt CO ₂ -eq	82,7 Mtep ⁷
Participação do diesel nas emissões de GEE do setor de transportes	Participação do diesel no consumo energético do setor de transportes
45,3%	43,9%

Fonte: Adaptado de Brasil, 2017.

Em relação a etapa de operação (EO), simulada no *DesignBuilder*, foi considerada para a ACV apenas a energia referente ao cenário onde a iluminação artificial e o aparelho de condicionamento ambiental podem ser acionados simultaneamente, por representarem melhor as condições de ocupação em ambos os sistemas construtivos.

Para as etapas de operação e demolição, os valores de energia foram multiplicados por um fator de emissões de CO₂-eq referentes à produção de eletricidade no Brasil (FCO₂-eq). Esse fator foi obtido através dos dados disponíveis no Balanço Energético Nacional de ano base 2016 (BRASIL, 2017), conforme Tabela 10, de emissão de GEE e consumo de energia elétrica, chegando-se ao valor de 0,04 kgCO₂-eq/MJ.

Tabela 10: Dados de emissões de GEE e consumo de energia no ano de 2016.

Emissões antrópicas de GEE	Consumo final de energia
428,95 Mt CO ₂ -eq	255,4 Mtep

Fonte: Adaptado de Brasil, 2017.

Os processos de produção de cada material escolhido nas DAP's para os sistemas de PC e VC encontram-se descritos no Apêndice A.

3.3.2 Avaliação pelo GaBi

Conforme mencionado no item anterior, utilizou-se o banco de dados contido no *software* GaBi educacional, sendo que o mesmo auxiliou na transformação dos dados de entrada em valores de impacto ambiental. A base de dados é de 2017, devido à sua disponibilidade no *software* em sua versão educacional. Na Figura 20 apresenta-se a tela de exibição principal do *software*.

⁷ A unidade tep (tonelada equivalente de petróleo) equivale a $41,87 \times 10^3$ MJ.

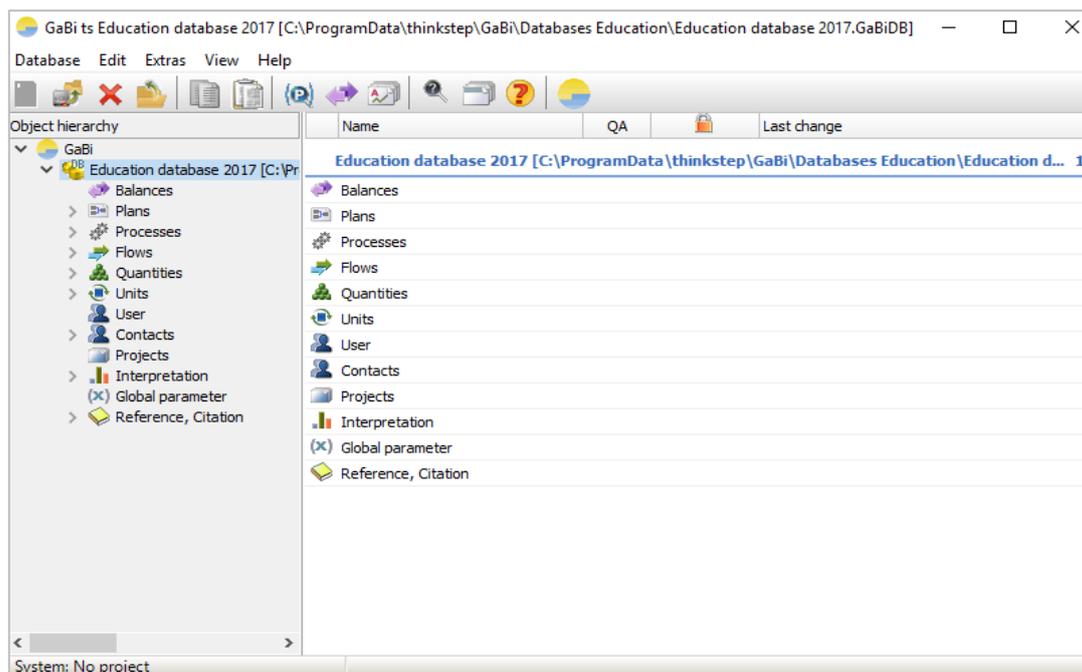


Figura 20: Tela de exibição do *software GaBi*.

Com o quantitativo dos materiais que compõem cada sistema de vedação, estes foram inseridos no *software GaBi*. Cada material foi inserido dentro da etapa da ACV correspondente e, por isso, é denominado um dado de entrada. Cada dado de entrada é reconhecido pelo *GaBi* como um fluxo de processos elementares de entrada. Os fluxos de saída são os produtos de cada etapa da ACV em questão, sejam eles resíduos e/ou o produto acabado.

Para a fase de pré-uso, a etapa de produção (EP) foi incluída no *GaBi* por meio de dados de entrada e saída, cujos fluxos que contém o processo produtivo foram encontrados no próprio banco de dados do programa, sendo quando possível, escolhido aquele que mais se assemelha a realidade brasileira. Os resíduos da construção foram inseridos como dado de saída.

A etapa de transporte (ET) foi incluída no fluxograma de cada sistema, e o caminhão e o combustível foram escolhidos dentro da base de dados do *software*. Para o cálculo de emissões de CO₂-eq nas etapas de transporte dos materiais do ponto da fábrica até o local da obra, dos resíduos gerados na execução até o aterro, dos materiais empregados na manutenção da fábrica até a obra, e dos resíduos de demolição/desconstrução até o destino final, foi considerado o uso de caminhão *Truck*, abastecido com diesel. No *software GaBi*, as especificações do caminhão *Truck* são: caminhão articulado, peso bruto de 34 a 40t, e capacidade de carga útil de 27t.

No *GaBi*, as entradas do caminhão *Truck* são diesel e carga, e as saídas são emissões de cargas e combustão (amônia, benzeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, monóxido de nitrogênio, dióxido de nitrogênio, óxido nitroso, COV, partículas PM_{2,5} e dióxido de enxofre).

Além dos dados de entrada referentes aos insumos e ao transporte, também foi inserido o consumo energético referente à fase de uso e a fase de fim de vida. A energia elétrica escolhida no *GaBi* corresponde aos dados da matriz energética brasileira, encontrada na base de dados do próprio *software*.

A energia operacional, simulada no *DesignBuilder*, foi inserida como entrada no fluxo de simulação. Considerou-se para a ACV apenas a energia referente ao cenário onde a iluminação artificial e o aparelho de condicionamento ambiental podem ser acionados simultaneamente, por representarem melhor as condições de ocupação em ambos os sistemas construtivos.

A energia consumida na demolição foi encontrada da seguinte forma: a partir do volume demolido calculado para as paredes de concreto, a energia incorporada foi obtida por meio de uma correlação com os valores de EI apresentados por Pedroso (2015) a partir dos ensaios realizados. Por fim, esses valores foram inseridos como dado de entrada no *software GaBi* a fim de serem convertidos para a categoria de impacto definida.

Os materiais referentes aos sistemas PC e VC foram escolhidos conforme disposição no banco de dados do *software* e seus detalhes de produção estão no Apêndice B.

3.4 INTERPRETAÇÃO

No presente trabalho, foi analisada a categoria de impacto potencial de aquecimento global (CO₂-eq), classificados dentro de saúde humana. Nessa fase, foi verificado se o objetivo e o escopo definidos no começo da ACV foram cumpridos. Além disso, foi na fase de interpretação que ocorreu a detecção dos pontos críticos. Esses representam as etapas do ciclo de vida responsáveis pelos maiores valores apresentados numa categoria ambiental, bem como o material (ou componente) que mais significativamente contribuiu dentro da etapa considerada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE HÍBRIDA

5.1.1 Levantamento de materiais

O quantitativo de insumos em função da unidade funcional (U.F.) adotada para o sistema PC está apresentado na Tabela 11. Os valores apresentados para a massa referente às fôrmas considera o potencial de reutilização das mesmas. O concreto representa 99% em massa entre os materiais considerados. Os dados completos utilizados para chegar a essas quantidades são apresentados no Apêndice C.

Tabela 11: Quantitativo de materiais por unidade funcional (m² de parede) - Sistema PC.

Materiais e componentes		Massa Total (kg)	Massa/U.F. (kg/m ²)
Materiais	Concreto 25 MPa	54409,95	429,27
	Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4 mm	240,40	1,90
	Espaçadores para tela soldada em PVC	5,50	0,04
TOTAL		54655,85	431,21
Fôrmas	Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	4956,60	0,04
	Fôrmas em painéis de PVC	2230,47	0,18
	Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	8674,05	1,37

O quantitativo de insumos em função da unidade funcional (U.F.) adotada para o sistema VC está apresentado na Tabela 12. O concreto refere-se ao material empregado nos pilares e vigas estruturais, portanto a brita está incluída neste item. Cimento, areia e cal referem-se à argamassa, ao chapisco e ao reboco.

Observa-se uma participação expressiva em massa do bloco cerâmico, areia e concreto, que juntos representam 87% em massa do sistema para 1 m² de parede. Os dados completos utilizados para chegar a essas quantidades são apresentados no Apêndice D.

Tabela 12: Quantitativo de materiais por unidade funcional (m² de parede) - Sistema VC.

Materiais e componentes	Massa Total (kg)	Massa/U.F. (kg/m ²)
Bloco cerâmico furado 9 cm	14001,37	110,46
Cimento CII-E	6254,04	49,34
Areia	29962,48	236,39
Cal hidratada	885,07	6,98
Concreto 25 MPa	8173,35	64,48
Aço	243,91	1,92
Chapa de madeira compensada plastificada (2200x12x1100 mm)	394,63	3,11
TOTAL	59914,86	472,70

5.1.2 Comparação entre os tipos de forma para sistema PC

Em relação ao tipo de fôrma, na Tabela 13 são apresentadas as quantidades em massa relativas a cada uma, em relação à unidade funcional definida no escopo da avaliação, tanto com o valor total de massa pela U.F. quanto considerando o potencial de reutilização das mesmas. Verifica-se que considerando apenas uma utilização, a maior participação em massa é das fôrmas em painéis mistos, seguido pelos painéis em alumínio e PVC. Quando se considera o potencial de reutilização das mesmas, a ordem entre os painéis de PVC e alumínio invertem, sendo o de PVC o segundo maior representativo em massa, e o de alumínio o mais vantajoso.

Tabela 13: Quantidade de material de formas de alumínio, PVC e mistas em função do número de utilizações.

Materiais e componentes	Quantidade Total (kg/m ²)	Número de Reutilizações	Quantidade com Reutilizações (kg/m ²)
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	39,11	1000	0,04
Fôrmas em painéis de PVC	17,60	100	0,18
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	68,43	50	1,37

As Tabelas 14 e 15 apresentam as emissões de GEE referentes aos tipos de fôrma, sendo que na Tabela 14 são apresentados os dados para as fôrmas sem considerar o fator de reutilização, e na Tabela 15, considerando esse uso potencial.

Analisando as duas tabelas, verifica-se que o mesmo comportamento apresentado com as contribuições em massa se repete para as emissões de CO₂-eq. Quando considerada somente

uma utilização (Tabela 14), as fôrmas mistas apresentam maior impacto potencial ao meio ambiente, seguida pelas de alumínio, e por fim as de PVC. Os valores encontrados de emissão de CO₂-eq devem-se aos processos produtivos desses materiais, que necessitam de aquecimento a elevadas temperaturas.

Conforme descreve Costa (2012), o processo de produção do alumínio apresenta diversas etapas de beneficiamento, que envolvem trituração, refinamento e grande uso de energia. As reações químicas envolvidas nos processos emitem dióxido de carbono. Além disso, são necessárias fontes de calor para fundição, laminação, extrusão do alumínio.

Para a produção do PVC também é necessária grande quantidade de energia para aquecimento, ele é produzido a partir do dicloro de etileno, que é aquecido em fornos a altas temperaturas sendo decomposto para produzir cloreto de vinila e cloreto de hidrogênio. O cloreto de vinila passa então por processos que envolvem pressão e aquecimento até chegar ao produto final (COSTA, 2012).

Tabela 14: Emissão de GEE dos três tipos de fôrmas considerando uma utilização.

Fôrmas	Quant./U.F.	Unid.	Fator de Emissão de CO ₂ -eq		Fonte	Emissões em kgCO ₂ -eq
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	39,105	kg/m ²	7,568	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	295,95
Fôrmas em painéis de PVC	17,597	kg/m ²	9,85	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	173,33
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	68,434	kg/m ²	-			348,68
<i>compensado (40%)</i>	<i>0,061</i>	<i>m³/m²</i>	<i>623,55</i>	<i>kgCO₂-eq/m³</i>	SAADE	<i>37,93</i>
<i>alumínio (60%)</i>	<i>41,061</i>	<i>kg/m²</i>	<i>7,568</i>	<i>kgCO₂-eq/kg</i>	EPD	<i>310,75</i>

Porém, ao considerar o fator de reutilização (Tabela 15), as fôrmas em painéis mistos continuam sendo as que emitem maior quantidade de GEE em sua produção, mas as fôrmas em alumínio passam a ser muito vantajosas ambientalmente, já que suas emissões de CO₂-eq representam 17,3% das emissões relativas às fôrmas de PVC e 4,3% das emissões relativas às fôrmas em painéis mistos.

Tabela 15: Emissão de GEE dos três tipos de fôrmas considerando seus potenciais de reutilização.

Fôrmas	Quant./U.F.	Unid.	Fator de Emissão de CO ₂ -eq		Fonte	Emissões em kgCO ₂ -eq
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	0,039	kg/m ²	7,568	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	0,30
Fôrmas em painéis de PVC	0,176	kg/m ²	9,85	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	1,73
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	1,369	kg/m ²	-			6,97
<i>compensado (40%)</i>	<i>0,001</i>	<i>m³/m²</i>	<i>623,55</i>	<i>kgCO₂-eq/m³</i>	<i>SAADE</i>	<i>0,76</i>
<i>alumínio (60%)</i>	<i>0,821</i>	<i>kg/m²</i>	<i>7,568</i>	<i>kgCO₂-eq/kg</i>	<i>EPD</i>	<i>6,21</i>

A diferença entre as emissões potenciais de GEE fica nítida ao analisar a Figura 21. Quando se consideram os fatores de reutilização, a fôrma de alumínio passa a apresentar o menor valor entre as três fôrmas. Isso constitui uma grande vantagem desse sistema de fôrmas, que é o mais utilizado quando se trata de obras com grande número de repetições.

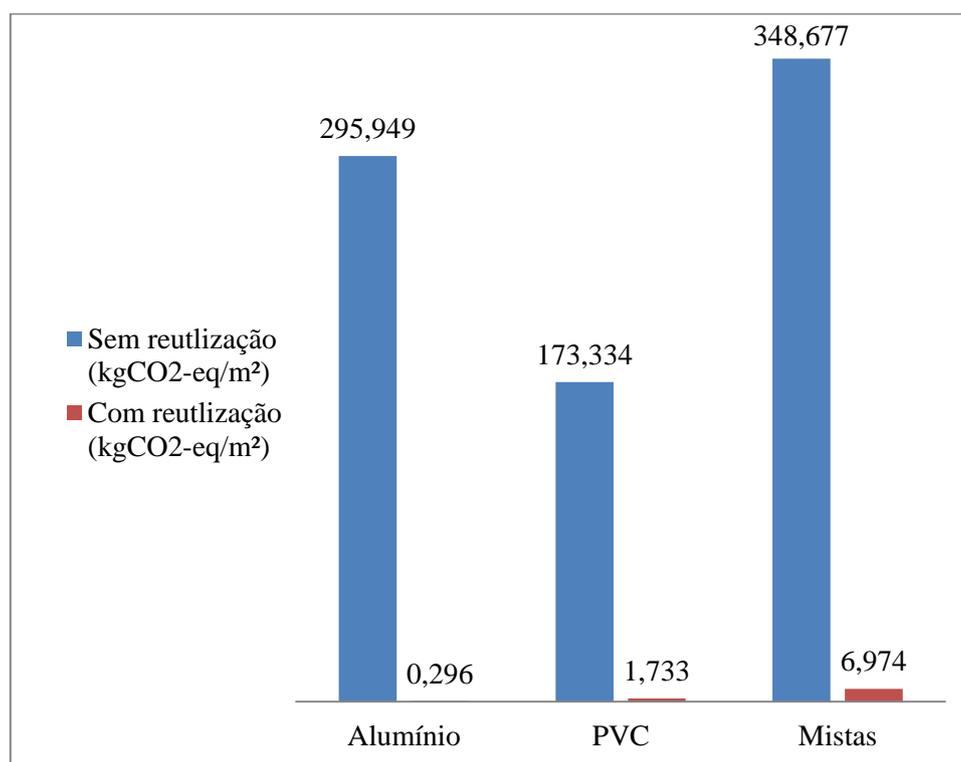


Figura 21: Gráfico de comparação entre os tipos de fôrmas.

Desse modo, é evidente a superioridade do uso de fôrmas em alumínio, ou mesmo em PVC, devido ao melhor manuseio dentro do canteiro de obras, já que são mais leves, e também

devido ao seu desempenho ambiental no que se refere ao potencial de aquecimento global. Para tanto, é necessário que exista cuidado no manuseio dos painéis, para que possam ser utilizados na totalidade de seu potencial, de modo a evitar descartes por danos ao material.

Os resultados para emissões de GEE apresentados se assemelham aos resultados obtidos para emissões de CO₂ encontrados no trabalho de Braga, Lira e Sposto (2017), no qual se verificou que as fôrmas mistas apresentam maior emissão de CO₂ na fase de pré-uso, seguida pela de alumínio e por último a de PVC. Porém, considerando o fator de reutilização das mesmas, a de alumínio passa a ser a menos poluente entre as três.

5.1.3 Emissões de CO₂-eq na Etapa de Produção - EP

Nas Tabelas 16 a 19 são apresentados os resultados de potencial de aquecimento global para a etapa de produção dos sistemas. Na Tabela 16, têm-se as emissões de GEE para o sistema PC com fôrmas de alumínio. Como esperado, a maior participação nas emissões é do concreto, com 95,62%.

Tabela 16: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – PC (alumínio).

Parede de Concreto	Quant./m ²	Unid.	Fator de emissão de CO ₂ -eq		Fonte	Emissões em kgCO ₂ -eq	Percentual (%)
Concreto 25MPa	0,179	m ³	267	kgCO ₂ -eq/m ³	EPD	47,756	95,62
Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4mm (dupla)	1,897	kg	0,773	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	1,466	2,94
Espaçadores para tela soldada em PVC	0,043	kg	9,85	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	0,427	0,85
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	0,039	kg	7,568	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	0,296	0,59
Emissão Total (kgCO ₂ -eq)						49,946	100

A Tabela 17 traz os resultados de emissão de GEE para o sistema PC com fôrmas de PVC. Nesse caso, o percentual referente às emissões do concreto diminuiu para 92,94% devido a maior participação das fôrmas de PVC nos impactos em relação às fôrmas de alumínio.

Tabela 17: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – PC (PVC).

Parede de Concreto	Quant./m ²	Unid.	Fator de emissão de CO ₂ -eq		Fonte	Emissões em kgCO ₂ -eq	Percentual (%)
Concreto 25MPa	0,179	m ³	267	kgCO ₂ -eq/m ³	EPD	47,756	92,94
Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4mm (dupla)	1,897	kg	0,773	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	1,466	2,85
Espaçadores para tela soldada em PVC	0,043	kg	9,85	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	0,427	0,83
Fôrmas em painéis de PVC	0,176	kg	9,85	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	1,733	3,37
Emissão Total (kgCO ₂ -eq)						51,383	100

Na Tabela 18 têm-se os resultados de emissão de GEE para o sistema PC com fôrmas mistas, que possuem a maior representatividade de emissões em relação aos demais tipos de fôrmas. Nesse cenário, o concreto passa a ter 84,34% das emissões de GEE.

Tabela 18: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – PC (mistas).

Parede de Concreto	Quant./m ²	Unid.	Fator de emissão de CO ₂ -eq		Fonte	Emissões em kgCO ₂ -eq	Percentual (%)
Concreto 25MPa	0,179	m ³	267	kgCO ₂ -eq/m ³	EPD	47,756	84,34
Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4mm (dupla)	1,897	kg	0,773	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	1,466	2,59
Espaçadores para tela soldada em PVC	0,043	kg	9,85	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	0,427	0,75
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	1,369	kg	5,095	kgCO ₂ -eq/kg	EPD/SAADE	6,974	12,32
Emissão Total (kgCO ₂ -eq)						56,623	100

E por fim, na Tabela 19 apresentam-se os valores de emissão de GEE passa o sistema VC. Nesse cenário, o cimento tem a maior participação no potencial de aquecimento global do sistema, com 46,43%, seguido pelo bloco cerâmico, com 31,61% das emissões. A areia, que possui grande contribuição em massa, passa a apresentar o menor impacto ambiental, pois o fator de emissão de CO₂-eq desse material em sua manufatura é pequeno comparado com os demais.

Tabela 19: Emissão de GEE na Etapa de Produção (EP) – VC.

Vedação Convencional	Quant./m ²	Unid.	Fator de emissão de CO ₂ -eq		Fonte	Emissões em kgCO ₂ -eq	Percentual (%)
Bloco cerâmico furado 9cm	110,464	kg	0,24	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	26,511	31,61
Cimento	49,342	kg	0,7891	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	38,935	46,43
Areia	0,158	m ³	0,01	kgCO ₂ -eq/m ³	SAADE	0,002	0,002
Cal	6,983	kg	0,78	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	5,447	6,49
Concreto 25MPa	0,027	m ³	267	kgCO ₂ -eq/m ³	EPD	7,174	8,55
Aço	1,924	kg	0,767	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	1,476	1,48
Chapa de madeira compensada plastificada (2200x12x1100 mm)	0,007	m ³	623,55	kgCO ₂ -eq/m ³	SAADE	4,314	5,14
Emissão Total (kgCO ₂ -eq)						83,859	100

O cimento e o bloco cerâmico apresentam os maiores teores de emissões. No caso do cimento isso acontece devido ao processo produtivo, no qual são utilizados grandes fornos para a calcinação do clínquer, chegando a temperaturas de aproximadamente 1400 °C, além do uso de moinhos para o refinamento das partículas calcinadas. Os blocos cerâmicos também passam por processo de queima a elevadas temperaturas, e como muitas vezes a energia para a execução desses processos provém de combustíveis fósseis, tem-se uma elevada emissão de GEE.

Analisando os quatro cenários, verifica-se que o sistema convencional apresenta a maior quantidade de emissões de GEE, sendo 1,68 vezes maior que o sistema PC com fôrmas de alumínio, 1,63 vezes maior que o sistema PC com fôrmas de PVC, e 1,48 vezes maior que o sistema PC com fôrmas mistas.

No estudo de energia incorporada (EI) realizado por Pedroso (2015), ocorre um comportamento semelhante ao observado para os resultados encontrados de emissões de GEE: o sistema convencional apresenta maior EI na fase de pré-uso que o sistema de paredes de concreto.

5.1.4 Levantamento de distâncias de transporte

Na Tabela 20 são apresentadas as distâncias percorridas para o transporte dos insumos necessários à construção da unidade habitacional, para o sistema PC. É possível observar que para muitos dos itens, a distância de transporte da fábrica ao local da obra é bastante expressiva. As distâncias percorridas para o transporte dos materiais e componentes foram retiradas do *Google Maps*.

Tabela 20: Distâncias de transporte na Etapa de Transporte Inicial (ETi) – Sistema PC.

Materiais e componentes	Local da fábrica	Distância (km)
Concreto 25 MPa	Brasília – DF	20,5
Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4 mm	Divinópolis – MG	805
Espaçadores para tela soldada em PVC	Mauá – SP	1057
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	Campo Grande – RJ	1187
Fôrmas em painéis de PVC	Piracicaba – SP	902
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	Campo Grande –RJ	1187
Resíduos da construção	Brasília - DF	25

Na Tabela 21 são apresentadas as distâncias percorridas para o transporte dos materiais referentes ao sistema VC.

Tabela 21: Distâncias de transporte na Etapa de Transporte Inicial (ETi) – Sistema VC.

Materiais e componentes	Local da fábrica	Distância (km)
Bloco cerâmico furado 9 cm	Rondonópolis – MT	934
Cimento CII-E	Sobradinho – DF	27,6
Areia	Ipameri – GO	294
Cal hidratada	Sobradinho – DF	27,6
Concreto 25 MPa	Brasília – DF	20,5
Aço	Divinópolis – MG	805
Chapa de madeira compensada plastificada (2200x12x1100 mm)	União da Vitória – PR	1490
Resíduos da construção	Brasília - DF	25

5.1.5 Emissões de CO₂-eq na Etapa de Transporte inicial - ETi

Nas Tabelas 22 a 24 são apresentadas as emissões de GEE referentes ao transporte de materiais do ponto fabril até o local da obra. Na Tabela 22 tem-se a emissão de GEE para os materiais do sistema PC. Observa-se que o maior impacto no que tange ao potencial de aquecimento global na ETi é o transporte do concreto, mesmo com a pequena distância percorrida, devido a quantidade de material. O total de emissões de GEE nessa etapa é de 0,58 kgCO₂-eq/m², valor cerca de 85 vezes menor que o apresentado para a etapa de produção (EP) desse sistema.

Tabela 22: Emissão de GEE na Etapa de Transporte inicial (ETi) – PC.

PAREDE DE CONCRETO	Distância (km)	Massa (kg)	Litros de Diesel	Litros/U.F.	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
Concreto 25MPa	20,5	54409,95	30,339	0,239	0,492
Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4mm (dupla)	805	240,395	5,264	0,042	0,085
Espaçadores para tela soldada em PVC	1057	5,5	0,158	0,001	0,003
Resíduos da construção	25	56,168	0,038	0,0003	0,001

Na Tabela 23 apresentam-se as emissões de GEE da ETi para o transporte de fôrmas. Os valores completos utilizados para o cálculo, tanto do transporte de materiais quanto das fôrmas do sistema PC, encontram-se descritos no Apêndice E.

Tabela 23: Emissão de GEE na Etapa de Transporte inicial (ETi) – Fôrmas.

FÔRMAS	Distância (km)	Massa (kg)	Litros de Diesel	Litros/U.F.	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	1187	0,039	0,001	0,00001	0,00002
Fôrmas em painéis de PVC	902	0,176	0,004	0,00003	0,00007
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	1187	1,369	0,044	0,00035	0,0007

A Tabela 24 traz as emissões de GEE na ETi para o transporte de materiais do sistema VC. O total de emissões nessa etapa é de 10,16 kgCO₂-eq/m², valor 8,3 vezes menor que o total de emissões na etapa de produção (EP). Os valores completos utilizados para o cálculo encontram-se descritos no Apêndice F.

Tabela 24: Emissão de GEE na Etapa de Transporte inicial (ETi) – VC.

SISTEMA CONVENCIONAL	Distância (km)	Massa (kg)	Litros de Diesel	Litros/U.F.	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
Bloco cerâmico furado 9cm	934	14001,366	355,702	2,806	5,769
Cimento	27,6	6254,045	4,695	0,037	0,076
Areia	294	29962,484	239,604	1,890	3,886
Cal	27,6	885,073	0,664	0,005	0,011
Concreto 25MPa	20,5	8173,354	4,557	0,036	0,074
Aço (5mm)	805	20,591	0,451	0,004	0,007
Aço (10mm)	805	223,319	4,890	0,039	0,079
Chapa de madeira compensada plastificada (2200x12x1100 mm)	1490	394,628	15,993	0,126	0,259
Resíduos da construção	25	80,57	0,055	0,0004	0,001

As emissões na Etapa de Transporte dependem da massa dos materiais e da distância percorrida da indústria até o local da obra, portanto quanto maiores essas variáveis, maior será o consumo de diesel, e conseqüentemente, maior o impacto nas emissões de GEE. No entanto, conforme verificado em Caldas (2016), essa etapa apresenta uma participação pequena diante das demais fases do ciclo de vida da edificação.

5.1.6 Emissões de CO₂-eq na Etapa de Operação - EO: simulação energética no *software DesingBuilder*

Como descrito anteriormente, a simulação considerou o uso de equipamento para condicionamento artificial, em toda a vida útil (50 anos) da habitação, sempre que necessário o acionamento do mesmo, e o uso da iluminação artificial. A simulação foi feita no *software DesignBuilder*. O modelo gerado no *software* é apresentado na Figura 22.

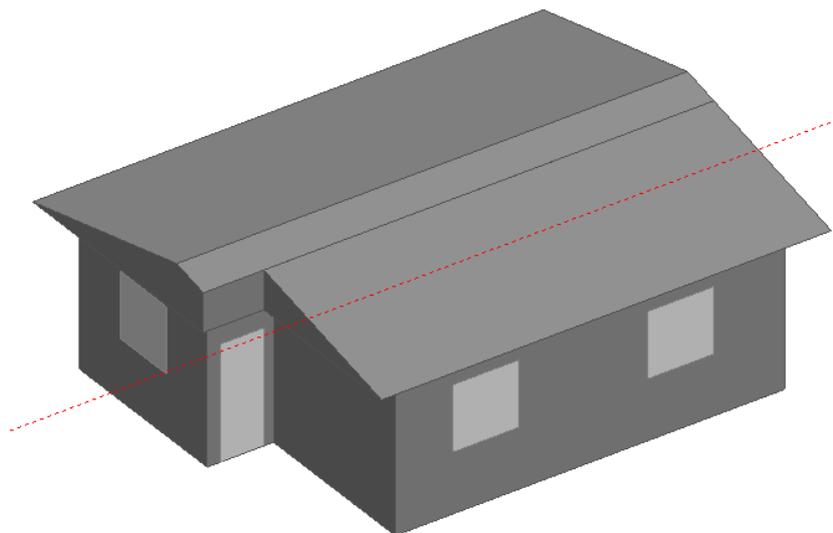


Figura 22: Modelo da habitação simulada no *software*.

Os resultados de consumo energético para a etapa de operação na fase de uso durante toda a vida útil considerada (50 anos) são apresentados na Tabela 25. É possível observar que o sistema de PC apresenta maior necessidade de condicionamento artificial que o de VC. Essa análise é coerente, visto que o sistema de PC, mesmo com espessura 2,5 cm superior a de VC, possui transmitância térmica 1,55 vezes maior (ver Tabela 7), facilitando o fluxo de calor para o ambiente interno. Além disso, percebe-se que a presença de iluminação aumenta a necessidade de condicionamento em ambos os sistemas.

Tabela 25: Consumo energético (MJ) para condicionamento artificial e iluminação na EO durante a vida útil por unidade funcional.

Consumo energético (MJ/m ²) na etapa de operação			
Sistema	IA ligada	AC ligado	AC+IA ligados
PC	2389,93	2731,02	6216,13
VC	2208,01	1187,73	3056,44

Na Figura 23 apresenta-se o resultado de emissão de CO₂-eq na etapa de operação dos sistemas. Verifica-se que esta é a etapa com maior emissão de GEE entre todo o ciclo de vida para ambos os sistemas, PC e VC. O sistema PC, por apresentar transmitância maior que o VC, consome maior quantidade de energia para o condicionamento, e conseqüentemente, possui maior impacto no que se refere ao potencial de aquecimento global nessa etapa, cerca de duas vezes mais quando se considera o uso simultâneo de ar condicionado e iluminação.

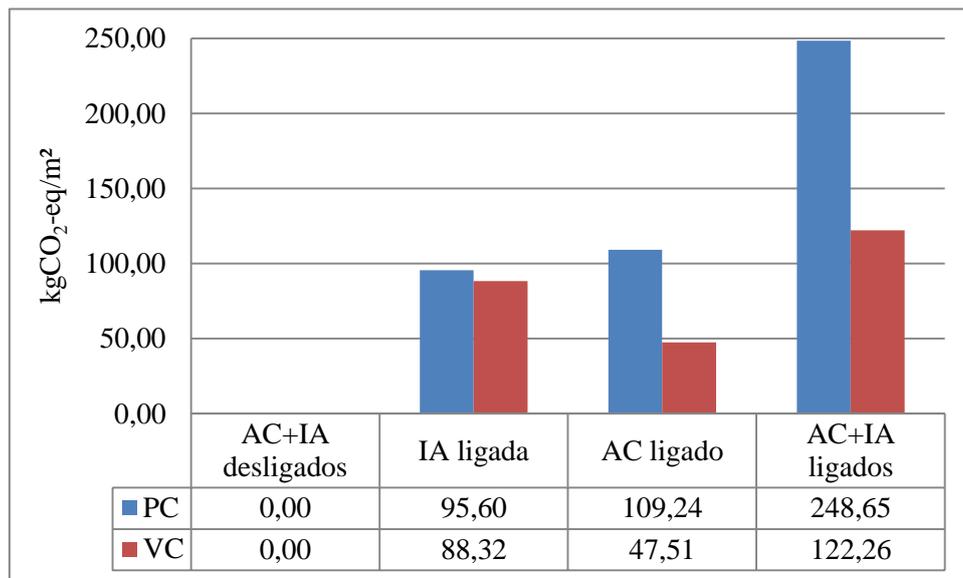


Figura 23: Emissão de CO₂-eq (kg/m²) total na etapa de operação - EO.

No estudo de Caldas (2016), observou-se que tanto no consumo de energia total como nas emissões de CO₂, a fase de uso (operacional e manutenção) foi a mais representativa ao longo do ciclo de vida da edificação, sendo que a EO foi superior à EM. No trabalho de Lira (2017), a EO também representou a maior parcela no que se refere às emissões de GEE.

5.1.7 Emissões de CO₂-eq na Etapa de Manutenção - EM

A Tabela 26 apresenta o quantitativo de materiais empregados na etapa de manutenção do sistema VC, calculados com base nos componentes do sistema com vida útil inferior a vida útil total da habitação (chapisco e reboco), que é de 50 anos.

Tabela 26: Quantidade de materiais na EM para sistema VC.

Materiais	Quant. Total		F.R.	Total de Manut.		Total/U.F.	
Cimento	6254,04	kg	0,25	1563,51	kg	12,34	kg/m ²
Areia	19,97	m ³	0,25	4,99	m ³	0,04	m ³ /m ²
Cal	885,07	kg	0,25	221,27	kg	1,75	kg/m ²

Os resultados de potencial de aquecimento global referentes ao processo produtivo desses materiais encontram-se na Tabela 27. Como esperado, o cimento apresenta a maior contribuição em emissões de GEE nessa etapa, com 87,72% do total.

Tabela 27: Emissão de GEE referente ao processo produtivo para a EM.

Materiais	Total/U.F.		Fator de Emissão de CO ₂ -eq		Fonte	Emissão em kgCO ₂ -eq	Percentual (%)
Cimento	12,34	kg/m ²	0,7891	kgCO ₂ -eq/kg	EPD	9,734	87,72
Areia	0,04	m ³ /m ²	0,01	kgCO ₂ -eq/m ³	SAADE	0,0004	0,004
Cal	1,75	kg/m ²	0,78	kgCO ₂ -eq/kg	SAADE	1,362	12,27

Na Tabela 28 são apresentadas as emissões de GEE referentes ao transporte dos materiais até a obra. Verifica-se que a contribuição nessa etapa é bastante inferior à encontrada para o processo produtivo, representando 8,96% da mesma. Outro aspecto relevante é que no que diz respeito a areia, o transporte da mesma apresenta maior potencial de impacto ao meio ambiente que sua extração e produção.

Tabela 28: Emissão de GEE referente ao transporte de materiais para a EM.

Materiais	Distância (km)	Massa (kg)	Litros de Diesel	Litros/U.F	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
Cimento	27,6	1563,51	1,17	0,009	0,019
Areia	294	7490,62	59,90	0,473	0,971
Cal	27,6	221,27	0,17	0,001	0,003
Resíduos da construção	25	73,149	0,04976	0,00039	0,0008

5.1.8 Emissões de CO₂-eq na Etapa de Desconstrução - ED

Na Tabela 29 são apresentadas as emissões potenciais de GEE para a desconstrução dos sistemas PC e VC, conforme aplicação dos resultados obtidos por Pedroso (2015). Verifica-se

que para o sistema VC, o gasto energético é 1,4 vezes maior que para o PC, que leva a um maior impacto potencial ao meio ambiente no que tange às emissões de CO₂-eq.

Tabela 29: Emissão de GEE na Etapa de Desconstrução (ED).

Sistema	Volume construído (m ³ /m ²)	Fator de correção de volume	Volume desconstruído (m ³ /m ²)	Energia de desconstrução (MJ/m ²)	Emissão de CO ₂ -eq (kg)
PC	0,175	1,8	0,315	0,65	0,026
VC	0,15	1,5	0,22	0,93	0,037

5.1.9 Emissões de CO₂-eq na Etapa de Transporte Final - ETf

A distância percorrida para a disposição do material de demolição após o fim da vida útil encontra-se na Tabela 30.

Tabela 30: Distâncias de transporte na Etapa de Transporte Final (ETf).

Materiais e componentes	Local de destinação	Distância (km)
Resíduos de demolição	Aterro (Brasília – DF)	25 km

A partir da massa dos sistemas e da distância de transporte foram obtidas as emissões referentes ao transporte do material ao final da vida útil em função da U.F., conforme apresentado na Tabela 31. Nesse caso, o impacto potencial devido ao transporte final para o sistema VC supera em 9,6% as emissões provocadas no transporte final para o sistema PC.

Tabela 31: Emissão de GEE na Etapa de Transporte Final - ETi.

Sistema	Massa Total (kg)	Distância (km)	Litros de Diesel	Litros/UF	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
PC	54655,85	25	37,17	0,29	0,603
VC	59914,86	25	40,74	0,32	0,661

5.1.10 Resultado final da Análise Híbrida

Após todos os cálculos apresentados, os valores totais para cada etapa do ciclo de vida foram computados a fim de compará-los. A Tabela 32 traz os resultados obtidos por meio da análise híbrida para o sistema PC, utilizando fôrmas de alumínio. Verifica-se que o maior percentual

de emissões encontra-se na etapa de operação, seguido pela etapa de produção, que juntas, representam 99% do potencial de aquecimento global calculado para o sistema.

Tabela 32: Resultado da análise híbrida – Sistema PC (alumínio).

Análise Híbrida – Resultado PC (fôrmas de alumínio)			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	49,946	16,66
	ETi	0,581	0,19
Uso	EO	248,65	82,94
Fim de vida	ED	0,026	0,01
	ETf	0,603	0,20
Total		299,80	100

Para o cenário do sistema de PC com fôrmas em PVC (Tabela 33), a análise é basicamente igual à verificada para o cenário com fôrmas em alumínio. A diferença verificada refere-se ao maior potencial de impacto referente ao aquecimento global na etapa de produção das fôrmas, que nesse caso é 5,76 vezes superior que a de alumínio, provocando um aumento de 2,88% na etapa de produção.

Tabela 33: Resultado da análise híbrida – Sistema PC (PVC).

Análise Híbrida – Resultado PC (fôrmas de PVC)			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	51,383	17,06
	ETi	0,581	0,19
Uso	EO	248,65	82,54
Fim de vida	ED	0,026	0,01
	ETf	0,603	0,20
Total		301,24	100

No caso do sistema PC com fôrmas mistas (Tabela 34), há um aumento na etapa de produção devido à manufatura das fôrmas, provocando um incremento de 13,37% em relação à EP do cenário com fôrmas em alumínio e de 10,2% em relação à EP do cenário com fôrmas em PVC.

Tabela 34: Resultado da análise híbrida – Sistema PC (mistas).

Análise Híbrida – Resultado PC (fôrmas mistas)			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	56,623	18,48
	ETi	0,581	0,19
Uso	EO	248,65	81,13
Fim de vida	ED	0,026	0,01
	ETf	0,603	0,20
Total		306,48	100

A Tabela 35 apresenta os resultados para o sistema VC. Nesse cenário, a etapa de produção é bastante superior em relação aos cenários com PC, conforme verificado no item 5.3 deste capítulo. Entretanto, a etapa de operação apresenta metade das emissões de GEE verificadas para o sistema PC, devido às características de transmitância térmica apresentadas pelos sistemas. Dessa forma, mesmo com uma etapa de produção significativamente superior, o sistema VC, considerando todas as fases do ciclo de vida analisadas, possui menor valor de emissões de GEE, que chega a representar cerca de 75% dos valores apresentados para os cenários com PC.

Tabela 35: Resultado da análise híbrida – Sistema VC.

Análise Híbrida – Resultado VC			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	83,859	36,61
	ETi	10,162	4,44
Uso	EO	122,26	53,37
	EM	12,089	5,28
Fim de vida	ED	0,037	0,02
	ETf	0,661	0,29
Total		229,07	100,00

O mesmo comportamento é observado no estudo realizado por Souza *et al.* (2016), em que as emissões de gases de efeito estufa encontradas ao longo do ciclo de vida de 1 m² de parede em vedação convencional foram aproximadamente metade das emissões encontradas para 1 m² de parede de concreto.

A Figura 24 apresenta os valores totais de potencial de aquecimento global em porcentagem para cada um dos sistemas construtivos avaliados. Verifica-se que o sistema VC apresenta o maior percentual de emissões de GEE na fase de pré-uso quando comparado aos demais

cenários para sistema PC. Devido às características das propriedades térmicas dos sistemas, o sistema VC apresenta menor percentual em relação à fase de uso, mesmo estando presente nesse sistema a etapa de manutenção, além da etapa de operação.

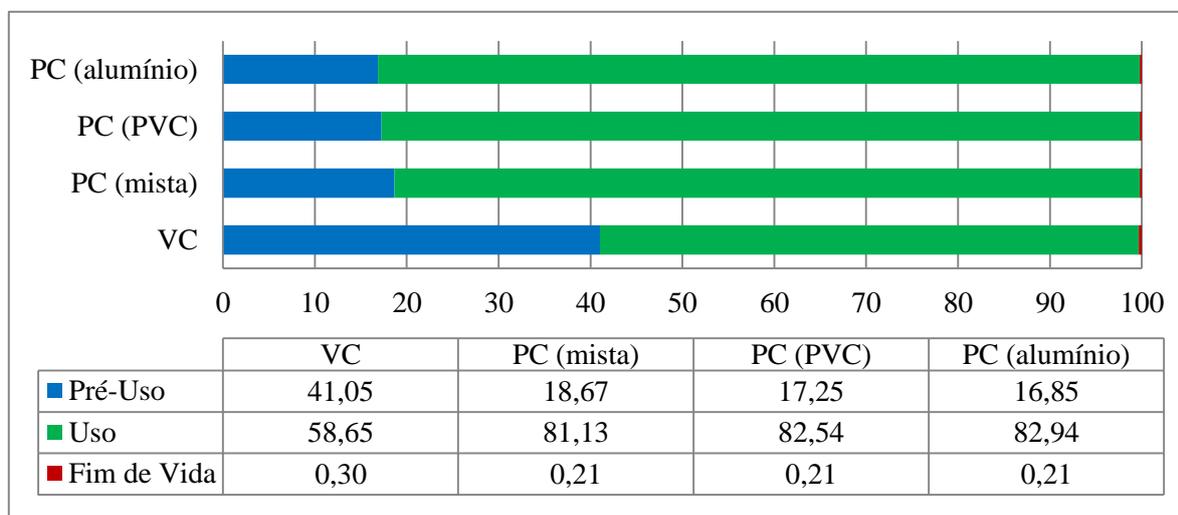


Figura 24: Percentual (%) de potencial de aquecimento global por fase – Análise híbrida.

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO GABI

A seguir serão apresentados os dados de entrada e saída inseridos no *software GaBi*, bem como os resultados por ele obtidos.

5.2.1 Inventário do ciclo de vida

As planilhas com o quantitativo e a discriminação de dados de entrada e saída estão reunidas nas Tabelas 36 a 44 a seguir. Todas foram adaptadas do *GaBi* para melhor compreensão do fluxograma apresentado nos Apêndices G a J. Todos os valores apresentados estão por unidade funcional (1 m² de parede) e para todo o período admitido de vida útil da habitação (50 anos).

Nas Tabelas 36 a 39 têm-se as entradas e saídas em massa para a etapa de produção dos sistemas.

Tabela 36: Etapa de produção (EP) do sistema PC com fôrma de alumínio.

Massa: Entradas e Saídas - PC (fôrmas de alumínio)			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Concreto	Massa	429,27	kg
Tela	Massa	1,897	kg
Espaçador	Massa	0,043	kg
Fôrma de Alumínio	Massa	0,039	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
PC	Massa	375,04	kg
Resíduos da Construção	Massa	56,168	kg

Tabela 37: Etapa de produção (EP) do sistema PC com fôrma de PVC.

Massa: Entradas e Saídas - PC (fôrmas de PVC)			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Concreto	Massa	429,27	kg
Tela	Massa	1,897	kg
Espaçador	Massa	0,043	kg
Fôrma de PVC	Massa	0,18	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
PC	Massa	375,04	kg
Resíduos da Construção	Massa	56,168	kg

Tabela 38: Etapa de produção (EP) do sistema PC com fôrma mista.

Massa: Entradas e Saídas - PC (fôrmas mistas)			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Concreto	Massa	429,27	kg
Tela	Massa	1,897	kg
Espaçador	Massa	0,043	kg
Alumínio (fôrma mista)	Massa	0,55	kg
Compensado (fôrma mista)	Massa	0,82	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
PC	Massa	375,04	kg
Resíduos da Construção	Massa	56,168	kg

Tabela 39: Etapa de produção (EP) do sistema VC.

Massa: Entradas e Saídas - VC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Bloco cerâmico	Massa	110,46	kg
Cimento	Massa	49,34	kg
Areia	Massa	236,39	kg
Cal hidratada	Massa	6,98	kg
Concreto	Massa	64,48	kg
Aço	Massa	1,92	kg
Compensado	Massa	3,11	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
VC	Massa	392,13	kg
Resíduos da Construção	Massa	80,57	kg

As Tabelas 40 e 41 trazem os dados de entrada e saída em massa e energia para a etapa operacional dos sistemas.

Tabela 40: Etapa operacional (EO) do sistema PC.

Massa e Energia: Entradas e Saídas - PC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
PC	Massa	375,04	kg
Eletricidade (AC e IA)	Energia	6216,13	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
PC	Massa	375,04	kg

Tabela 41: Etapa operacional (EO) do sistema VC.

Massa e Energia: Entradas e Saídas - VC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
VC	Massa	392,13	kg
Eletricidade (AC e IA)	Energia	3056,44	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
VC	Massa	392,13	kg

Na Tabela 42 são apresentados os fluxos em massa para os dados de entrada e saída da etapa de manutenção do sistema de vedação convencional.

Tabela 42: Etapa de manutenção (EM) do sistema VC.

Massa: Entradas e Saídas - VC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Cimento	Massa	12,335	kg
Areia	Massa	59,068	kg
Cal	Massa	1,746	kg
VC	Massa	392,13	kg
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
VC	Massa	392,13	kg
Resíduos da Construção	Massa	73,149	kg

E por fim, as Tabelas 43 e 44 apresentam os dados de entrada e saída em massa e energia para a etapa de desconstrução de ambos os sistemas.

Tabela 43: Etapa de desconstrução (ED) do sistema PC.

Massa e Energia: Entradas e Saídas - PC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
PC	Massa	375,04	kg
Eletricidade (desconstrução)	Energia	0,65	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Resíduos da Construção	Massa	375,04	kg

Tabela 44: Etapa de desconstrução (ED) do sistema VC.

Massa e Energia: Entradas e Saídas - VC			
Entradas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
VC	Massa	392,13	kg
Eletricidade (desconstrução)	Energia	0,93	MJ
Saídas			
Fluxo		Quantidade	Unidade
Resíduos da Construção	Massa	392,13	kg

5.2.2 Resultado de potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq)

A Tabela 45 apresenta os resultados de potencial de aquecimento global para o sistema PC com fôrmas em alumínio. Assim como na avaliação feita com a análise híbrida, as etapas EO e EP foram as mais representativas, chegando juntas a 99,7% das emissões de GEE durante o ciclo de vida considerado.

Tabela 45: Resultado da ACV no GaBi – Sistema PC (alumínio).

GaBi – Resultado PC (fôrmas de alumínio)			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	46,966	7,85
	ETi	1,019	0,17
Uso	EO	549	91,83
Fim de vida	ED	0,057	0,01
	ETf	0,807	0,13
Total		598,204	100,00

Analisando a Tabela 46, que apresenta os resultados referentes ao pré-uso para o cenário de PC com fôrmas em alumínio, verifica-se que o concreto é o maior responsável pelas emissões de GEE do sistema em ambas as etapas de produção e transporte inicial, mesmo comportamento verificado na análise híbrida, com 91,19% das emissões.

Tabela 46: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema PC (alumínio).

Pré-uso – PC (fôrmas de alumínio)						
Materiais	EP	Percentual (%)	ETi	Percentual (%)	Pré-uso	Percentual (%)
Concreto	43	91,56	0,758	74,39	43,76	91,19
Tela soldada	3,790	8,07	0,121	11,88	3,91	8,15
Espaçadores	0,143	0,30	0,0039	0,38	0,15	0,31
Fôrma (alumínio)	0,033	0,07	0,004	0,39	0,04	0,08
Resíduos	-	-	0,132	12,96	0,13	0,28
Total	46,966	100	1,019	100	47,98	100

Os resultados de potencial de aquecimento global para o sistema PC com fôrmas em PVC são apresentados na Tabela 47. Há um incremento de 1,22% em relação ao cenário com fôrmas de alumínio na EP, devido ao maior impacto no processo produtivo das fôrmas em PVC.

Tabela 47: Resultado da ACV no GaBi – Sistema PC (PVC).

GaBi – Resultado PC (fôrmas de PVC)			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	47,540	7,94
	ETi	1,028	0,17
Uso	EO	549	91,74
Fim de vida	ED	0,057	0,01
	ETf	0,807	0,13
Total		598,434	100,00

A Tabela 48 apresenta os resultados para a fase de pré-uso para o cenário do sistema PC com a utilização de fôrmas em PVC, que assim como ocorreu com o cenário com fôrmas em alumínio, o concreto permanece sendo o maior responsável pelas emissões de GEE, com 90,14% do total de emissões nessa fase do ciclo de vida.

Tabela 48: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema PC (PVC).

Pré-uso – PC (fôrmas de PVC)						
Materiais	EP	Percentual (%)	ETi	Percentual (%)	Pré-uso	Percentual (%)
Concreto	43	90,50	0,758	73,71	43,78	90,14
Tela soldada	3,786	7,96	0,121	11,77	3,91	8,04
Espaçadores	0,143	0,30	0,0039	0,38	0,15	0,30
Fôrma (PVC)	0,587	1,23	0,014	1,36	0,60	1,24
Resíduos	-	-	0,132	12,79	0,13	0,27
Total	47,540	100	1,028	100,00	48,57	100

Os resultados de potencial de aquecimento global para o cenário com sistema PC e fôrmas mistas encontram-se na Tabela 49. Nesse caso, há um incremento na EP de 2% em relação ao cenário com fôrmas de alumínio e de 0,76% em relação ao cenário com fôrmas de PVC.

Tabela 49: Resultado da ACV no GaBi – Sistema PC (mistas).

GaBi – Resultado PC (fôrmas mistas)			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	47,901	8,00
	ETi	1,154	0,19
Uso	EO	549	91,67
Fim de vida	ED	0,057	0,01
	ETf	0,807	0,13
Total		598,920	100,00

Os resultados para a fase de pré-uso para o cenário do sistema PC com fôrmas mistas são apresentados na Tabela 50. Assim como nos demais cenários com sistema PC, o concreto é o maior responsável pelas emissões de GEE, com 89,25% do total de emissões nessa fase.

Tabela 50: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema PC (mista).

Pré-uso – PC (fôrmas mistas)						
Materiais	EP	Percentual (%)	ETi	Percentual (%)	Pré-uso	Percentual (%)
Concreto	43	89,82	0,758	65,65	43,78	89,25
Tela soldada	3,786	7,90	0,132	11,39	3,92	7,99
Espaçadores	0,143	0,30	0,0039	0,34	0,15	0,30
Fôrma (PVC)	0,948	1,98	0,140	12,13	1,09	2,22
Resíduos	-	-	0,121	10,48	0,12	0,25
Total	47,901	100	1,154	100,00	49,06	100

Na Tabela 51 é apresentado o resultado de potencial de aquecimento global para o sistema VC. Nesse cenário, a etapa de produção do sistema VC apresenta valores de emissão de GEE muito superiores em relação aos cenários com PC, aproximadamente 1,8 vezes maior, mesma ordem de grandeza observada para a análise híbrida, que foi em média 1,6 vezes maior (ver item 5.3).

Entretanto, assim como verificado na análise híbrida, a etapa de operação apresenta metade das emissões de GEE do sistema PC. Assim, mesmo com a etapa de produção apresentando maior impacto potencial, o sistema VC, considerando todas as fases do ciclo de vida analisadas, possui menor valor de emissões de GEE, que chega a representar aproximadamente 64% dos valores encontrados para os cenários com sistema PC.

Tabela 51: Resultado da ACV no GaBi – Sistema VC.

GaBi – Resultado VC			
Fase	Etapa	Potencial de Aquecimento Global (kgCO ₂ -eq)	Percentual (%)
Pré-uso	EP	84,963	22,03
	ETi	15,859	4,11
Uso	EO	270,000	70,02
	EM	13,860	3,59
Fim de vida	ED	0,082	0,02
	ETf	0,844	0,22
Total		385,61	100

Os resultados referentes à fase de pré-uso do sistema VC são dispostos na Tabela 52. Verifica-se que, assim como na análise híbrida, os materiais com maior impacto no percentual de emissões de GEE desse sistema são o cimento e o bloco cerâmico, chegando a representar 84% das emissões de GEE da fase de pré-uso e 89,1% da etapa de produção.

Essa análise é coerente, visto que, além de serem representativos em massa no sistema VC, apresentam processos produtivos com grande potencial de impacto em relação às emissões de CO₂-eq, pois incluem o uso de fornos que chegam a elevadas temperaturas e são movidos principalmente com o uso de combustíveis fósseis.

Tabela 52: Resultado da fase de pré-uso no GaBi – Sistema VC.

Pré-uso - VC						
	EP	Percentual (%)	ETi	Percentual (%)	Pré-uso	Percentual (%)
Bloco cerâmico	31,261	36,79	8,884	56,02	40,146	39,82
Cimento	44,447	52,31	0,117	0,74	44,564	44,20
Areia	9,220	10,85	5,985	37,74	15,205	15,08
Cal	0,035	0,04	0,053	0,33	0,088	0,09
Concreto	6,463	7,61	0,114	0,72	6,576	6,52
Aço	2,400	2,82	0,133	0,84	2,533	2,51
Compensado	2,767	3,26	0,399	2,52	3,167	3,14
Resíduos	-	-	0,173	1,09	0,173	0,17
Total	84,963	100	15,859	100	100,822	100

Os resultados de potencial de aquecimento global referentes à etapa de manutenção do sistema VC encontram-se na Tabela 53. Como esperado, o cimento apresenta a maior contribuição em emissões de GEE nessa etapa, com 82,77% do total. As emissões apresentadas na etapa de transporte representam 3,25% das emissões na etapa de produção dos materiais.

Tabela 53: Resultado da etapa de manutenção (EM) no GaBi – Sistema VC.

Manutenção - VC						
	EP	Percentual (%)	ETi	Percentual (%)	EM	Percentual (%)
Cimento	11,112	82,77	0,017	3,81	11,128	80,29
Areia	2,304	17,16	0,254	58,34	2,558	18,46
Cal	0,009	0,07	0,008	1,72	0,016	0,12
Resíduo	-	-	0,157	36,13	0,157	1,14
Total	13,424	100	0,436	100	13,860	100

A partir da Figura 25, que apresenta os percentuais de cada fase do ciclo de vida para todos os cenários avaliados, verifica-se o mesmo comportamento encontrado com a análise híbrida. Porém na análise a partir do *GaBi* a fase de uso passa a ter maior impacto que na avaliação pela análise híbrida, devido aos coeficientes encontrados no banco de dados do *software* para a conversão de energia em potencial de aquecimento global.

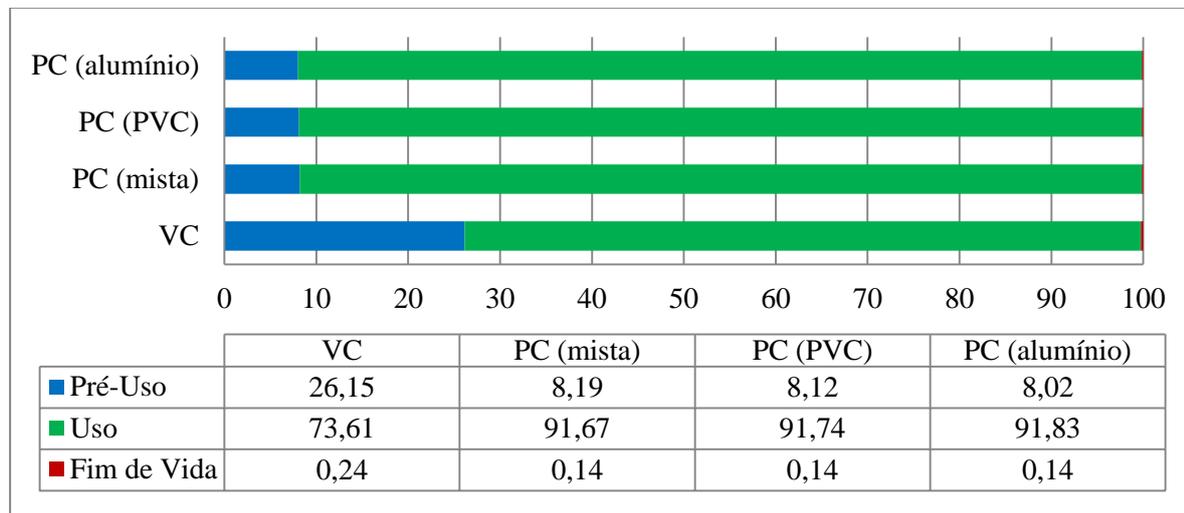


Figura 25: Percentual (%) de potencial de aquecimento global por fase –*GaBi*.

5.3 COMPARATIVO ANÁLISE HÍBRIDA X *GABI*

Em valores totais, verifica-se que mesmo diante do maior impacto na fase de pré-uso, o sistema VC mostra-se com melhor desempenho ambiental, no que se refere ao potencial de aquecimento global, que os demais cenários com sistema PC (Figura 26) em ambos os métodos de avaliação de impacto empregados. É nítido que a diferença encontrada entre os resultados totais obtidos pelo *GaBi* e pela análise híbrida deve-se aos diferentes coeficientes utilizados para a conversão de energia em emissão de GEE.

Quando se utiliza a Análise Híbrida, há maior flexibilidade na busca de dados. Nesta pesquisa optou-se por utilizar os dados de energia e emissões de gases de efeito estufa fornecidos pelo Balanço Energético Nacional mais recente, que apresenta valores oficiais disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), os quais são atualizados todos os anos. Dessa forma, esses dados representam melhor o cenário brasileiro que os contidos no banco de dados do *GaBi*.

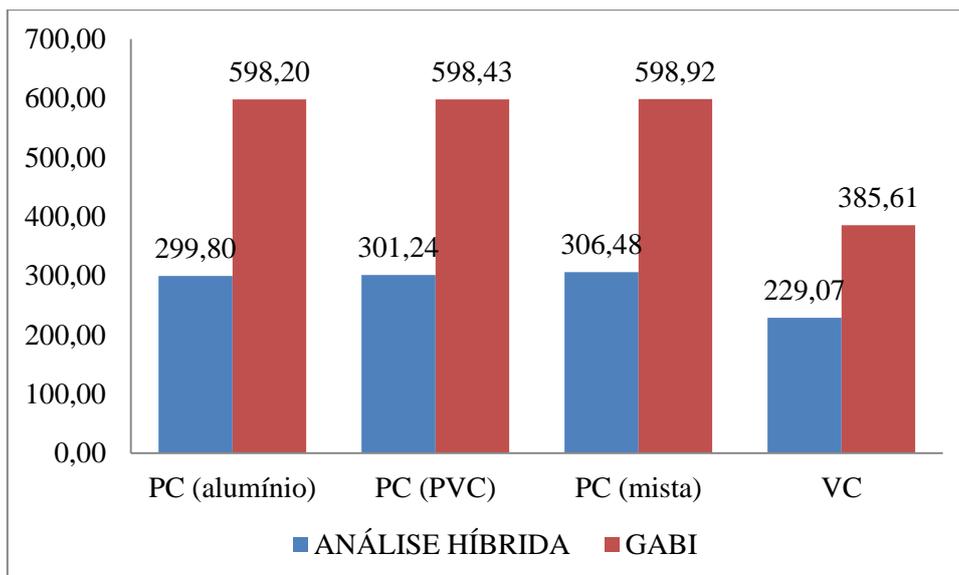


Figura 26: Total de potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq/m²) por sistema – comparativo.

Torna-se mais evidente essa avaliação quando são comparados os resultados para a fase de pré-uso de cada sistema. A partir dados apresentados na Figura 27, verifica-se que houve uma variação pequena em relação aos métodos de avaliação utilizados, mostrando que é possível realizar uma ACV a partir de dados da literatura na ausência de disponibilidade de um *software* que faça essa função.

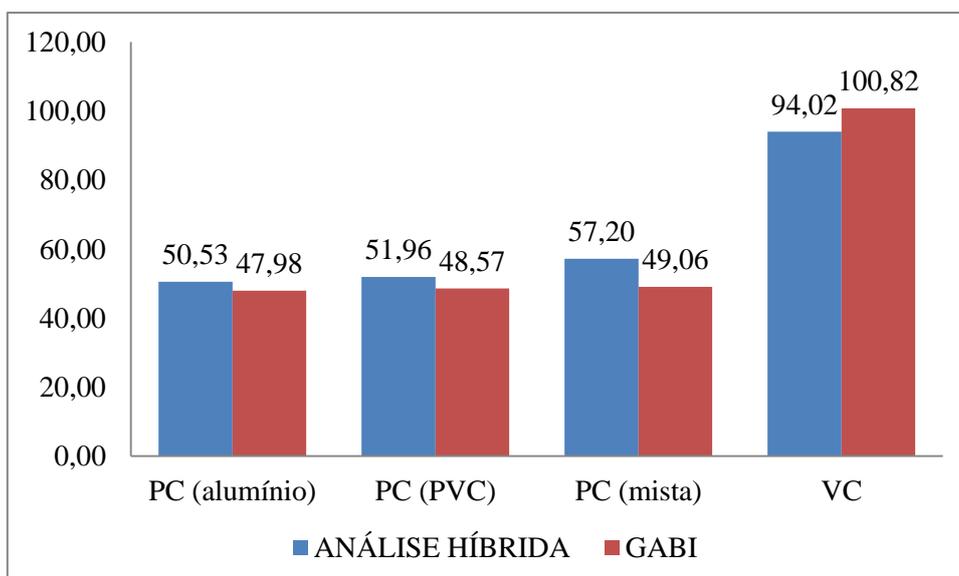


Figura 27: Potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq/m²) na fase de pré-uso – comparativo.

5.4 CONSIDERAÇÕES RELEVANTES

A fase de pré-uso foi a segunda mais impactante nas emissões de GEE, ficando atrás somente da fase de uso. No sistema PC, o concreto foi o principal responsável pelo potencial de aquecimento global na etapa de produção (EP), representando de 84,34% a 95,62% na análise híbrida e de 89,25% a 91,19% a partir da simulação no GaBi, dependendo do tipo de fôrma empregada. No sistema VC, os principais responsáveis foram o cimento e o bloco cerâmico, correspondendo juntos a 78,04% do total da EP na análise híbrida e 84,02% na simulação com o GaBi.

As etapas de transporte ETi e ETf juntas representaram 0,39% das emissões totais de GEE do ciclo de vida do sistema PC e 4,73% das emissões totais do sistema VC, para a análise híbrida. Na simulação com o GaBi, para o sistema PC, os transportes totais representaram 0,3% do potencial de aquecimento global, e para o sistema VC, 4,33%.

A fase de uso foi a principal contribuição no potencial de aquecimento global, devido principalmente ao elevado consumo energético na etapa de operação (EO) pelo uso do condicionamento artificial. Pela análise híbrida, a EO representou por volta de 82% do potencial de aquecimento global para o sistema PC, e 53,37% para o sistema VC. Com a simulação no GaBi, foi de aproximadamente 91,75% para o PC, e 70,02% para o VC.

A etapa de manutenção do sistema VC representou 5,28% do total de potencial de aquecimento global do sistema pela análise híbrida, e 3,59% pela simulação no GaBi.

A fase de fim de vida teve participação praticamente nula. A etapa de desconstrução representou 0,01% das emissões de GEE no sistema PC e 0,02% no sistema VC, tanto pela análise híbrida quanto pela simulação no GaBi. O maior responsável pelo potencial de aquecimento global na fase de fim de vida foi o transporte, e ainda assim, a fase teve pequena contribuição nas emissões de GEE.

A pequena contribuição da etapa de desconstrução diante das demais fases do ciclo de vida também foi evidenciada em outros estudos, como de Lira (2017), Caldas (2016) e Pedroso (2015).

6 CONCLUSÃO

Foi realizada a Avaliação do Ciclo de Vida para os sistemas de vedação vertical em paredes de concreto (PC) e sistema convencional (VC) para a categoria de impacto potencial de aquecimento global, por meio dos métodos utilizados Análise Híbrida (dados secundários) e GaBi (*midpoint*).

Na avaliação da contribuição de cada fase do ciclo de vida, verificou-se que a etapa de operacional (EO), contida na fase de uso, e a etapa de produção (EP), na fase de pré-uso, são as maiores responsáveis pelo potencial de aquecimento global em todos os cenários avaliados. As etapas relacionadas ao transporte e a etapa de desconstrução apresentam impacto pouco significativo diante das duas etapas citadas.

Foi visto que o sistema de parede de concreto (PC) se mostrou mais vantajoso ambientalmente que a vedação convencional quando se analisa isoladamente a fase de pré-uso, mesmo com a utilização de uma espessura superior ao valor usual para que atenda aos requisitos de desempenho térmico. Isso poderia ser ainda mais evidente se as paredes internas fossem concebidas com espessura inferior a das externas, já que não participam do desempenho térmico da edificação, e se o concreto fosse produzido a partir de cimentos com maiores teores de adições minerais, reduzindo a proporção de clínquer, que é um dos grandes responsáveis pelas emissões de carbono do cimento, devido ao processo de calcinação.

O uso de outros tipos de cimento com maiores teores de adições minerais poderia melhorar o desempenho ambiental na fase de pré-uso. Um cimento com baixo teor de clínquer apresentaria menores emissões de GEE, visto que os processos de queima e de calcinação do clínquer são os que mais consomem energia e mais emitem gases durante o processo de produção do cimento.

Apesar da potencial vantagem na fase de pré-uso, o sistema de parede de concreto (PC) se mostrou mais desfavorável nas fases de uso e pós-uso, com destaque para a etapa de operação (EO). É nela que são emitidos os maiores teores de GEE em ambos os sistemas, e há uma diferença considerável de impacto entre eles, sendo que na etapa de operação do sistema PC é emitido o dobro do que se verifica no sistema VC. Isso é atribuído às propriedades térmicas do concreto, cuja transmitância térmica é bastante superior a do sistema de vedação convencional em blocos cerâmicos. Com isso, tem-se que as construções correntes em PC em

Brasília, notadamente não atendem aos requisitos de norma, visto que são projetadas com espessuras inferiores a 17,5 cm.

É importante ressaltar que se considerou nessa pesquisa somente as vedações verticais. Avaliações que contemplem os sistemas de cobertura possibilitariam visualizar melhorias no desempenho térmico dos sistemas, ou mesmo a consideração do uso de recursos de projeto que visem minimizar o consumo energético com condicionamento artificial, e, desse modo, seriam geradas menores emissões de GEE durante o uso da edificação.

Além disso, foi considerada a absorvância de 0,6, referente a cores claras ou médias. O uso de cores escuras provocariam alterações no valor da absorvância e poderiam interferir diretamente nos resultados de consumo energético para o condicionamento artificial.

Em relação ao gasto energético para operação, no que diz respeito ao consumo de energia com aparelho de condicionamento artificial, foi possível concluir, por meio das simulações no *software DesignBuilder* que as propriedades de transferência de calor dos sistemas de vedação apresentam grande influência no conforto térmico do usuário, e conseqüentemente na elevação do gasto energético e emissões de gases de efeito estufa. Portanto, para uma redução dos impactos nessa etapa, é importante que seja considerado o desempenho térmico dos sistemas construtivos quando expostos às condições climáticas de cada região.

Em relação às fôrmas, tem-se que as mistas de compensado e estrutura metálica são as que mais emitem GEE na fase de pré-uso. As fôrmas de alumínio, por sua vez, apresentam maior impacto potencial que as constituídas de PVC, porém quando se considera o número de reutilizações possíveis, ela passa a ter melhor desempenho ambiental entre as três, no que tange ao potencial de aquecimento global.

A partir da comparação realizada com os tipos de fôrmas disponíveis no mercado para o sistema de parede de concreto, foi possível verificar a importância do manuseio adequado desses elementos durante a execução e armazenamento, de modo que alcancem a vida útil sugerida pelo fabricante e passem a contribuir em menores proporções nas emissões de GEE. Quando considerado todo o potencial de uso das mesmas, numa situação ideal, as fôrmas de alumínio se mostraram com melhor desempenho ambiental no que tange ao potencial de aquecimento global.

Por fim, os resultados obtidos com dados secundários na Análise Híbrida e nas simulações com o GaBi apresentaram comportamentos muito semelhantes, porém com valores distintos.

Essa diferença foi atribuída aos dados de consumo energético e de conversão para emissões de GEE. Verificou-se que os dados energéticos utilizados para a Análise Híbrida, por serem dados oficiais brasileiros, representam melhor a realidade nacional que os dados contidos no *software*. O uso da versão profissional do GaBi poderia minimizar essa diferença se nela forem encontrados dados atualizados e representativos da realidade brasileira. Mesmo com essa diferença, foi possível notar que na falta de um *software* de ACV, é possível chegar a bons resultados com dados disponíveis na literatura.

Assim, foram atingidos todos os objetivos definidos, e confirmaram-se as hipóteses dessa pesquisa, visto que o sistema PC apresentou maior emissão de GEE no seu ciclo de vida em relação ao sistema VC, e o desempenho térmico dos sistemas influenciou diretamente nas emissões da etapa de operação (EO).

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Observou-se que é necessário investir em sistemas construtivos com melhor desempenho, não apenas no que se refere à produtividade, mas também à sustentabilidade ambiental dos sistemas de vedação, e dos demais sistemas de uma edificação.

A avaliação de outras categorias de impacto também se faz necessária, já que a análise conjunta de todas as categorias gera uma visão ampla acerca dos demais impactos ambientais de um sistema.

Tendo que a EO apresentou a maior contribuição para o potencial de aquecimento global, é interessante simular outros cenários, como o estudo de outros contextos climáticos, e a consideração de soluções arquitetônicas que melhorem o desempenho térmico da edificação, minimizando a necessidade do uso de aparelhos de condicionamento artificial. Além disso, poderiam ser obtidos resultados distintos com a consideração de diferentes tipos de cobertura.

A avaliação para outros sistemas construtivos racionalizados/industrializados também é interessante, para fins de comparação, de modo a balizar escolhas ambientalmente conscientes dos construtores. Também seria objeto para pesquisas futuras a comparação de custos e aspectos sociais do ciclo de vida associados aos aspectos ambientais.

Outros estudos com sistema de parede de concreto em concreto leve poderiam ser interessantes para fins de comparação, visto que este material possui propriedades térmicas diferentes, e, dependendo do contexto climático avaliado, poderia apresentar redução das emissões de GEE na fase de uso, caso seu desempenho térmico seja superior ao concreto convencional na ZB em questão.

REFERÊNCIAS

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR ISO 14044**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 46 p.
- _____. **NBR 15220-2**. Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15220-3**. Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15.575-1**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 15.575-4**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho – Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 16.055**. Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012.
- AGOPYAN, V.. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras**. Relatório Final. PCC-USP/FINEP/ITQC, 5 volumes. 1355 p, 1998.
- AGUSTÍ-JUAN, Isolda *et al*. Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 154, p.330-340, jun. 2017. Elsevier BV.
- ANDRADE, F. R. **Metodologia para Avaliação do Processo de Desconstrução de Estruturas de Concreto Armado Pré-Fabricado de galpões: Estudo de Caso no DF e GO**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ATMACA, A.; ATMACA, N. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO_{2A}) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Building**, v. 102, p. 417-437, 2015.

BESSA, V. M. T. **Contribuição à Metodologia de Avaliação das Emissões de Dióxido de Carbono no Ciclo de Vida das Fachadas de Edifícios de Escritórios**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BRAGA, Núbia; LIRA, Júlia; SPOSTO, Rosa. ACVCO₂ de vedações verticais: um estudo de caso de parede de concreto armado moldado *in loco*. in: Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, VI., 2017, São Leopoldo. **Anais**. São Leopoldo: Euroelecs, 2017. p. 175 - 183.

BRASIL. **Decreto nº 7.983 de 8 de abril de 2013**. Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, e dá outras providências. Diário Oficial. Brasília, 2013.

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

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética EPE. **Balanco Energético Nacional 2017 ano base 2016**. Brasil, 2017.

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

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2016.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – CONMETRO. **Resolução nº 04**, de 15 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/resc/pdf/RESC000236.pdf>>. Acesso em: Dez. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Efeito Estufa e Aquecimento Global**. 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

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.

BUORO, A. B. *et al.* Análise comparativa na simulação de modelo habitacional nos softwares Energy Plus e TAS. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. **Anais...** . Florianópolis: Entac, 2006. p. 113 – 12.

CABEZA, L. F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 29, p. 394-416, 2014.

CAIXA. **Demanda habitacional no Brasil** / Caixa Econômica Federal. – Brasília, DF: CAIXA, 2011.

CAMPOS, Felipe Henrique Azevedo. **Análise do ciclo de vida na construção civil: um estudo comparativo entre vedações estruturais em painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CAMPOS, D. P.; PAIVA, L. A. **Energia incorporada na fase de pré-uso em habitações de interesse social de paredes de concreto armado moldadas *in loco***: Estudo de caso no DF. Monografia de Projeto Final, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 51p, 2013.

CARDOSO, Poliana Figueira. **Sistemas de Certificação Ambiental de Edificações habitacionais e possibilidades de aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. 2015. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

CASTRO, V. M. V. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) de Habitações de Interesse Social (HIS) de Paredes de Concreto Armado Moldadas no Local: Alternativas à Utilização de Formas de Alumínio**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64 p, 2014.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CALDAS, L. R. *et al.* Emissões de CO₂ no Ciclo de Vida de Habitações de Interesse Social: Estudo de Caso Para o DF, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO - INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 9, 2015, São Carlos. **Anais do IX SIBRAGEC**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2015.

CALDAS, L. R. **Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ de uma edificação habitacional unifamiliar de *light steel framing* para diferentes dados de inventário**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 177p, 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.

CHAU, C.K.; LEUNG, T.M.; NG, W.Y.. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, [s.l.], v. 143, p.395-413, abr. 2015. Elsevier BV.

CHEHEBE, J.R.B. **Análise de Ciclo de Vida de Produtos – ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro, Qualitymark Ed. 1998. ISBN 85-7303-948-23.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. **Coletânea de ativos: Parede de concreto**. 2007-2008.

DESIGNBUILDER. **DesignBuilder - Simulation Made Easy**. Disponível em: <<https://www.designbuilder.co.uk/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

EEA. European Environmental Agency. **Life Cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information sources**. Brussels: EEA, 1997. 119p. (Série Environmental Issues Series, n. 6). Disponível em < <http://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C> > Acessado em abril de 2017.

EIA. Energy Information Administration. **Annual Energy Outlook 2018**. Washington: EIA, 2018.

ENERGY PLUS. Energy Plus. Disponível em: <<https://energyplus.net>>. Acesso em: 9 fev. 2018.

FARIA, R. **Paredes Maciças**. Revista Técnica. v. 143, n. 17, 2009.

FERRÁNDEZ-GARCÍA, Antonio; IBÁÑEZ-FORÉS, Valeria; BOVEA, María D.. Eco-efficiency analysis of the life cycle of interior partition walls: a comparison of alternative solutions. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 112, p.649-665, jan. 2016. Elsevier BV.

GIESEKAM, Jannik *et al.* The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 78, p.202-214, ago. 2014. Elsevier BV.

GOUVEIA, H. L. V. **Indicadores de Desempenho em Habitações de Interesse Social no Brasil**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 176 p.

GRISOLI, R. P. S. **Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar no Brasil e os critérios da Diretiva Europeia para Energias Renováveis**. 110 f. (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GUINÉE, J. B. (Ed.) *et al.* **Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards**. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 2002.

HAN, Baolong *et al.* Life cycle assessment of ceramic façade material and its comparative analysis with three other common façade materials. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 99, p.86-93, jul. 2015. Elsevier BV.

HELLWEG, S.; CANALS, L. Mila I. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, [s.l.], v. 344, n. 6188, p.1109-1113, 5 jun. 2014. American Association for the Advancement of Science (AAAS).

IBICT. INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Desenvolvimento sustentável e avaliação do ciclo de vida**. Brasília, 2014.

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

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

LIRA, Júlia *et al.* Avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂ e desempenho térmico de habitações: estudo de caso do sistema construtivo Casa Express na cidade de Teresina – PI. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

LIRA, J. S. M. M. **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, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p, 2017.

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.

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.

NAKAMURA, J. **Escolha de fôrmas para paredes de concreto deve considerar critérios técnicos e econômicos**. Revista Techne. Edição 202, janeiro, 2014.

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, Publicação E.DM-009A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p. 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU BR). 2012. **A ONU e o meio ambiente**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>> Acesso em: 05/11/2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU BR). 2015. **COP 21**.

Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/cop21/>> Acesso em 25/11/2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU BR). 2017. **Conferência da ONU é encerrada com ‘urgência renovada’ contra mudanças climáticas**. Disponível

em: <<https://nacoesunidas.org/conferencia-da-onu-e-encerrada-com-urgencia-renovada-contra-mudancas-climaticas/>> Acesso em 05/01/2018.

ORTIZ, Oscar; CASTELLS, Francesc; SONNEMANN, Guido. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.28-39, jan. 2009. Elsevier BV.

PALÁCIO, C. D. U. **Energia incorporada de vedações para habitação de interesse social considerando-se o desempenho térmico**: Estudo de caso com utilização do Light Steel Frame no Entorno do DF. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 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, Lucas G. **Síntese dos métodos de pegada ecológica e análise energética para diagnóstico da sustentabilidade de países**: o Brasil como estudo de caso. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – UNICAMP, Campinas, 2008.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v.10, nº 1, p.31-51, 2010.

PRETOT, Sylvie; COLLET, Florence; GARNIER, Charles. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. **Building And Environment**, [s.l.], v. 72, p.223-231, fev. 2014. Elsevier BV.

PROCEL. **PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética nas Edificações**. 2006. Disponível em:

<<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

RAMIRES, Maiara Figueiredo. **Emissão de gases de efeito estufa e potencial de aquecimento global em sistemas de culturas intercalares ao tungue (*Aleurites fordii*)**. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SAADE, Marcella Ruschi Mendes *et al.* Material eco-efficiency indicators for Brazilian buildings. **Smart And Sustainable Built Environment**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.54-71, 13 maio 2014. Emerald.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldado in loco: avaliação do desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

SALCIDO, Juan C.; RAHEEM, Adeeba Abdul; RAVI, Srinivasan. Comparison of embodied energy and environmental impact of alternative materials used in reticulated dome construction. **Building And Environment**, [s.l.], v. 96, p.22-34, fev. 2016. Elsevier BV.

SAMANI, Pouya *et al.* A sustainability assessment of advanced materials for novel housing solutions. **Building And Environment**, [s.l.], v. 92, p.182-191, out. 2015. Elsevier BV.

SARNEY FILHO, José; MARCONDES, José Antônio (Org.). **Avaliação preliminar da COP 22. Marrakesh: Ministério do Meio Ambiente e Ministério das Relações Exteriores**, 2016.

SARTORI, I; HESTNES A.G.. **Energy use in the life cycle of conventional and lowenergy buildings: a review article**. Norwegian University of Science and Tecnology (NTNU); Noruega, 2006.

SEEG. SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Observatório do Clima. **Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Brasil 1970 - 2016**. São Paulo, 2017.

SHEN *et al.* Quantifying CO₂ emissions from China's cement industry. **Enewable and sustainable energy reviews**, p. 1004-1012, jun. 2015.

SIERRA-PÉREZ, Jorge; BOSCHMONART-RIVES, Jesús; GABARRELL, Xavier. Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 113, p.102-113, fev. 2016. Elsevier BV.

SILVA, B. V. **Construção de Ferramenta Para a Avaliação do Ciclo de Vida de Edificações**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SILVA, F. B. **Sistemas Construtivos: Paredes de concreto moldadas in loco**. Revista Técnica. Ed. 167, 2011.

SILVA, L. P. da. **Análise do Ciclo de Vida Energético de Habitações de Interesse Social**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

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.

SOUZA, Danielle Maia de *et al.* Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 137, p.70-82, nov. 2016. Elsevier BV.

SUZUKI, Eliane Hayashi. **Avaliação do conforto térmico e do nível de CO₂ em edifícios de escritório com climatização artificial na cidade de São Paulo**. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TAKANO, Atsushi *et al.* Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. **Building And Environment**, [s.l.], v. 79, p.20-30, set. 2014. Elsevier BV.

TAKANO, Atsushi *et al.* Life cycle energy balance of residential buildings: A case study on hypothetical building models in Finland. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 105, p.154-164, out. 2015. Elsevier BV.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese de doutorado, PPGEC, UFSC, Florianópolis, SC, 2006.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Life cycle assessment: a business guide to sustainability**. Paris: UNEP, 2007.

VINHAL, Laís David. **Estudo de indicadores ambientais de blocos cerâmicos com base em avaliação do ciclo de vida, considerando o contexto brasileiro**. 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

WU, Peng *et al.* The past, present and future of carbon labelling for construction materials – A review. **Building And Environment**, [s.l.], v. 77, p.160-168, jul. 2014. Elsevier BV.

YEPES, Víctor *et al.* CO₂-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls Based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy. **Journal Of Computing In Civil Engineering**, [s.l.], v. 26, n. 3, p.378-386, maio 2012. American Society of Civil Engineers (ASCE).

ZHOU, Ao; WONG, Kwun-wah; LAU, Denvid. Thermal Insulating Concrete Wall Panel Design for Sustainable Built Environment. **The Scientific World Journal**, [s.l.], v. 2014, p.1-12, 2014. Hindawi Limited.

APÊNDICE

APÊNDICE A: Processo de produção dos materiais escolhidos nas Declarações Ambientais de Produto.

MATERIAL: Concreto

ORIGEM DO DAP: Votorantim Cimentos (Brasil)

FATOR GWP: 267 kgCO₂-eq/m³

O concreto é produzido misturando cimento, agregados (areia e cascalho), água e aditivos - o mais usado é um plastificante que, além de dar plasticidade à mistura, atrasa o início da pega de concreto, permitindo sua entrega dentro de duas horas e meia. É feito o recebimento, a verificação e armazenamento. Os materiais recebidos são testados de acordo com as normas técnicas e os procedimentos operacionais da empresa. As matérias-primas são armazenadas em compartimentos e, em seguida, o carregador pneumático leva o agregado para o funil. Todas as matérias-primas possuem seu próprio silo, e um sistema automatizado alerta quando uma delas possui baixa quantidade e precisa ser reabastecido. Os materiais que compõem o concreto são separados, pesados e levados por transportador para a estação de carregamento, e são inseridos no misturador de concreto. A água e o aditivo também são colocados, bem como o cimento que cai dos silos que estão localizados logo acima. Todo esse processo é automatizado e controlado pela sala de controle. Depois disso, o concreto é misturado por cerca de dez minutos. Com o concreto misturado e pronto para ser entregue, o misturador recebe o selo que garante ao cliente que o caminhão saiu da central e chegou ao local de entrega sem ficar mal colocado e receber a fatura corretamente.

MATERIAL: Aço (tela soldada)

ORIGEM DO DAP: Alfa Acciai (Itália)

FATOR GWP: 773 kgCO₂-eq/ton

Inclui processos relativos ao pré-tratamento do minério, corte, moagem, separação, operações de transporte, produção de tarugos, processos de laminação a quente e a frio, embalagens, manuseio interno e materiais e atividades auxiliares.

MATERIAL: Alumínio (painéis)

ORIGEM DO DAP: Saray (Turquia)

FATOR GWP: 71,9 kgCO₂-eq/m²

Inclui o fornecimento de matéria-prima, a produção de cada produto é feita com matéria-prima local, mas alguns são transportados de outras partes do mundo. O fornecimento de matérias-primas inclui processos de extração e pré-tratamento antes da produção. O transporte é relevante na entrega de matérias-primas para a fábrica. A produção de painéis começa com o revestimento das folhas de alumínio nas camadas superior e inferior. O núcleo mineral e os aditivos de polímero orgânico são misturados em certas percentagens e o núcleo composto é

inserido entre duas folhas de alumínio com uma quantidade de adesivo para laminar as camadas do painel. Eletricidade e gás natural são consumidos durante a fabricação dos painéis compostos de alumínio.

MATERIAL: Cimento

ORIGEM DO DAP: Votorantim Cimentos (Brasil)

FATOR GWP: 789,1 kgCO₂-eq/ton

Inclui os processos de pré-homogeneização, onde o material extraído das minas é armazenado no quintal pré-misturado. Nesta fase, as amostras são coletadas para análise no laboratório de qualidade. A composição química da pedra calcária é obtida (teor de cálcio, silício, ferro e alumínio); processos de moagem, no qual o calcário é moído com argila e aditivos específicos (como minerais ferrosos e aluminosos ou substitutos de materiais processados) em um moinho. A argila é um produto rico em sílica, ferro e alumínio, que são essenciais para a qualidade do cimento. O produto final é composto de grãos muito finos, daí o nome da farinha. Um filtro instalado no moinho evita emissões de poeira para a atmosfera. A farinha é armazenada em silos especiais para serem enviados para o forno rotativo; produção de clínquer, na qual antes de ser inserido no forno rotativo, a farinha passa através da torre do ciclone para ser aquecida pelos gases quentes originados pelo forno que se encontra abaixo. Quando a farinha chega ao forno rotativo, já está em torno de 900°C, isso ajuda a reduzir o consumo de energia. Dentro do forno, a temperatura atinge 1450°C produzindo o clínquer; e processo de arrefecimento, onde para completar o processo de produção de clínquer, o material é arrefecido em um resfriador e a temperatura reduzida para menos de 200°C. Um filtro é instalado na saída da máquina, liberando o ar de refrigeração sem poluentes na atmosfera. Uma nova coleta de amostras é realizada para testes químicos no Laboratório de Controle de Qualidade. O clínquer é transportado para as funilhas, onde são armazenadas outras matérias-primas que compõem o cimento, tais como: gesso, pedra calcária e pozolana ou escória. Dependendo da porcentagem de cada produto, obtém-se uma especificação de cimento. Na moagem do cimento, a mistura vai para o moinho onde todos os componentes são moídos até atingir o tamanho de partícula ideal, resultando em cimento de alta qualidade; e por fim o envio, quem que após a moagem, o cimento é armazenado em silos para serem empacotados e comercializados.

MATERIAL: Aço (barras)

ORIGEM DO DAP: Gerdau (Chile)

FATOR GWP: 767 kgCO₂-eq/ton

Inclui processos para a coleta e preparação do minério (moagem), bem como a fundição do minério em forno de arco elétrico, refinamento através de um forno de colher e o processo de fundição do aço para a produção de lingotes de aço chamados de tarugos. Há também um laminador para aquecer os tarugos e moldá-los para formar as barras de aço.

APÊNDICE B: Processo de produção dos materiais no GaBi.

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 do respectivo material de forma representativa. A combinação com os processos unitários individuais que utilizam este material permite a geração de ACVs específicas para o usuário.

Todas as informações foram extraídas do *software* GaBi, tanto no sistema PC quanto no VC. Não foram encontradas informações de inventário que descrevessem o processo produtivo do PVC, da madeira compensada, e do bloco cerâmico no banco de dados do GaBi educacional.

Concreto (berço ao portão)
Concreto e argamassa são uma mistura de cimento, água e agregados (por exemplo, areia, cascalho, pedra, escória de alto forno) e, quando necessário, aditivos tais como condensadores, agentes retardadores ou agentes incorporadores de ar. As propriedades do concreto podem ser alteradas usando diferentes estruturas e grãos sólidos.

Alumínio (berço ao portão)
Perfis de alumínio são produzidos através do processo de extrusão. Esses perfis são produzidos a partir de lingotes de alumínio chamados tarugos (normalmente cilindros) que são prensados a temperatura quente (400-500 ° C) através de matrizes moldadas. Os tarugos de alumínio são produzidos por fundição DC (Direct Chill) em casas fundidas. Alumínio primário e reciclado, assim como elementos de liga (Mg, Si, etc.) são usados para produzir tarugos de alumínio.

Cimento (berço ao portão)
O cimento é um aglutinante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que se fixa e endurece por meio de reações e processos de hidratação e que, após o endurecimento, retém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água. O cimento Portland (CEM I) consiste em clínquer de cimento Portland e constituintes secundários menores, enquanto o clínquer de cimento Portland tem pelo menos 95% da soma de ambos. O sulfato de cálcio é adicionado aos outros constituintes do cimento Portland (CEM I) durante a sua fabricação para controlar o seu ajuste. Extração de matéria-prima, preparo de farinha, queima de clínquer, moagem de cimento e despacho estão incluídos na consideração da fabricação do cimento. As diferentes tecnologias comuns para a queima de clínquer (processo seco, processo semi-seco/semi-úmido, processo úmido) foram levadas em consideração. Além disso, o fornecimento (extração, preparação, transporte) de matérias-primas, combustíveis e eletricidade está incluído.

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.

Cal (berço ao portão)

O calcário como rocha orgânica sedimentar é extraído em pedreiras (mineração a céu aberto) por técnicas comuns de mineração (perfuração, jateamento, escavação). O agente blastig usado para jateamento é frequentemente fabricado com base de nitrato de amônio (ANFO, uma mistura de nitrato de amônio e óleo combustível é frequentemente usado). Outras técnicas de extração são feitas por máquinas pesadas, como escavadeiras, dumpers e dumpers movidos a diesel. Após a extração, o material é processado em uma planta de processamento. As etapas de processamento são de transporte, dimensionamento e britagem. Telas e moinhos vibratórios são frequentemente usados para processamento. A pedra de cal é então lavada com água para remover as impurezas.

Aço (berço ao portão)

Este conjunto de dados inclui extração de matéria-prima, processamento, fabricação, alto-forno, forno básico de oxigênio, laminação a quente. As entradas incluídas no Inventário do Ciclo de Vida referem-se a todos os insumos de matéria-prima, incluindo sucata de aço, energia, água e transporte. As saídas incluem aço e outros coprodutos, emissões para o ar, água e terra.

APÊNDICE C: Quantitativo de materiais para o sistema PC.

Os valores de perda dos componentes argamassa e blocos cerâmicos foram retirados da TCPO (2012). Para os outros componentes foram adotados os valores de Agopyan *et al.* (1998), de forma similar aos estudos de Bessa (2010), Pedroso (2015) e Caldas (2016).

PAREDE DE CONCRETO	QUANT.		PERDAS	TOTAL COM PERDAS		QUANT./U.F.		MASSA NOMINAL		MASSA TOTAL (kg)	MASSA/U.F. (kg/m ²)
Concreto 25MPa	19,71	m ³	1,15	22,67	m ³	0,18	m ³ /m ²	2400,00	kg/m ³	54409,95	429,27
Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4mm (dupla)	225,30	m ²	1,10	247,83	m ²	1,96	m ² /m ²	0,97	kg/m ²	240,40	1,90
Espaçadores para tela soldada em PVC	500,00	unid.	1,10	550,00	unid.	4,34	unid./m ²	0,01	kg/unid.	5,50	0,04
TOTAL										54655,85	431,21

FÔRMAS	QUANT.		PERDAS	TOTAL COM PERDAS		MASSA NOMINAL		MASSA TOTAL (kg)	MASSA TOTAL/U.F. (kg/m ²)	Nº DE UTIL.	MASSA/Nº DE UTILIZAÇÕES	MASSA/U.F. (kg/m ²)
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	225,30	m ²	1,10	247,83	m ²	20	kg/m ²	4956,60	39,11	1000	4,96	0,04
Fôrmas em painéis de PVC	225,30	m ²	1,10	247,83	m ²	9	kg/m ²	2230,47	17,60	100	22,30	0,18
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	225,30	m ²	1,10	247,83	m ²	35	kg/m ²	8674,05	68,43	50	173,48	1,37
<i>compensado (40%)</i>								3469,62	27,37	50	69,39	0,55
<i>alumínio (60%)</i>								5204,43	41,06	50	104,09	0,82

APÊNDICE D: Quantitativo de materiais para o sistema VC.

Os valores de perda dos componentes argamassa e blocos cerâmicos foram retirados da TCPO (2012). Para os outros componentes foram adotados os valores de Agopyan *et al.* (1998), de forma similar aos estudos de Bessa (2010), Pedroso (2015) e Caldas (2016).

SISTEMA CONVENCIONAL	QUANT.		PERDAS	TOTAL COM PERDAS		QUANT./U.F.		MASSA NOMINAL		MASSA TOTAL (kg)	MASSA/U.F. (kg/m ²)
Bloco cerâmico furado 9cm	6,95	m ³	1,26	8,75	m ³	0,07	m ³ /m ²	1600,00	kg/m ³	14001,37	110,46
Cimento	5211,70	kg	1,20	6254,04	kg	49,34	kg/m ²	-	-	6254,04	49,34
Areia	16,65	m ³	1,20	19,97	m ³	0,16	m ³ /m ²	1500,00	kg/m ³	29962,48	236,39
Cal	737,56	kg	1,20	885,07	kg	6,98	kg/m ²	-	-	885,07	6,98
Concreto 25MPa	2,96	m ³	1,15	3,41	m ³	0,03	m ³ /m ²	2400,00	kg/m ³	8173,35	64,48
Aço (5mm)	121,55	m	1,10	133,71	m	1,05	m/m ²	0,15	kg/m	20,59	0,16
Aço (10mm)	329,04	m	1,10	361,94	m	2,86	m/m ²	0,62	kg/m	223,32	1,76
Chapa de madeira compensada plastificada (2200x12x1100 mm)	0,76	m ³	1,15	0,88	m ³	0,01	m ³ /m ²	450,00	kg/m ³	394,63	3,11
TOTAL										59914,86	472,70

APÊNDICE E: Etapa de Transporte Inicial ETi - Sistema PC.

PAREDE DE CONCRETO	Local da Fábrica	Distância de Transporte (km)	Quantidade de Material (kg)	Litros de Diesel	Energia (MJ)	Litros/UF	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
Concreto 25MPa	Concrecon Brasília - DF	20,5	54409,950	30,339	1077,034	0,239	0,492
Tela soldada Q 61 - Malha 15x15 - diâmetro 3,4mm (dupla)	Gerdau Divinópolis - MG	805	240,395	5,264	186,861	0,042	0,085
Espaçadores para tela soldada em PVC	Mauá - SP	1057	5,500	0,158	5,614	0,001	0,003
Resíduos	Brasília - DF	25	56,168	0,038	1,356	0,0003	0,001

FÔRMAS	Local da Fábrica	Distância de Transporte (km)	Quantidade (kg)	Litros de Diesel	Energia (MJ)	Litros/UF	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
Fôrmas em painéis de alumínio extrudado	Av. Brasil, 45.208, Campo Grande – RJ, SH Formas	1187	0,039	0,001	0,045	0,00001	0,00002
Fôrmas em painéis de PVC	Av. Dr. Cássio Paschoal Padovani, 3235, B. Sertãozinho, Piracicaba – SP, Metro Modular	902	0,176	0,004	0,153	0,00003	0,00007
Fôrmas em painéis mistos de compensado e alumínio	Av. Brasil, 45.208, Campo Grande – RJ, SH Formas	1187	1,369	0,044	1,569	0,00035	0,0007

APÊNDICE F: Etapa de Transporte Inicial ETi - Sistema VC.

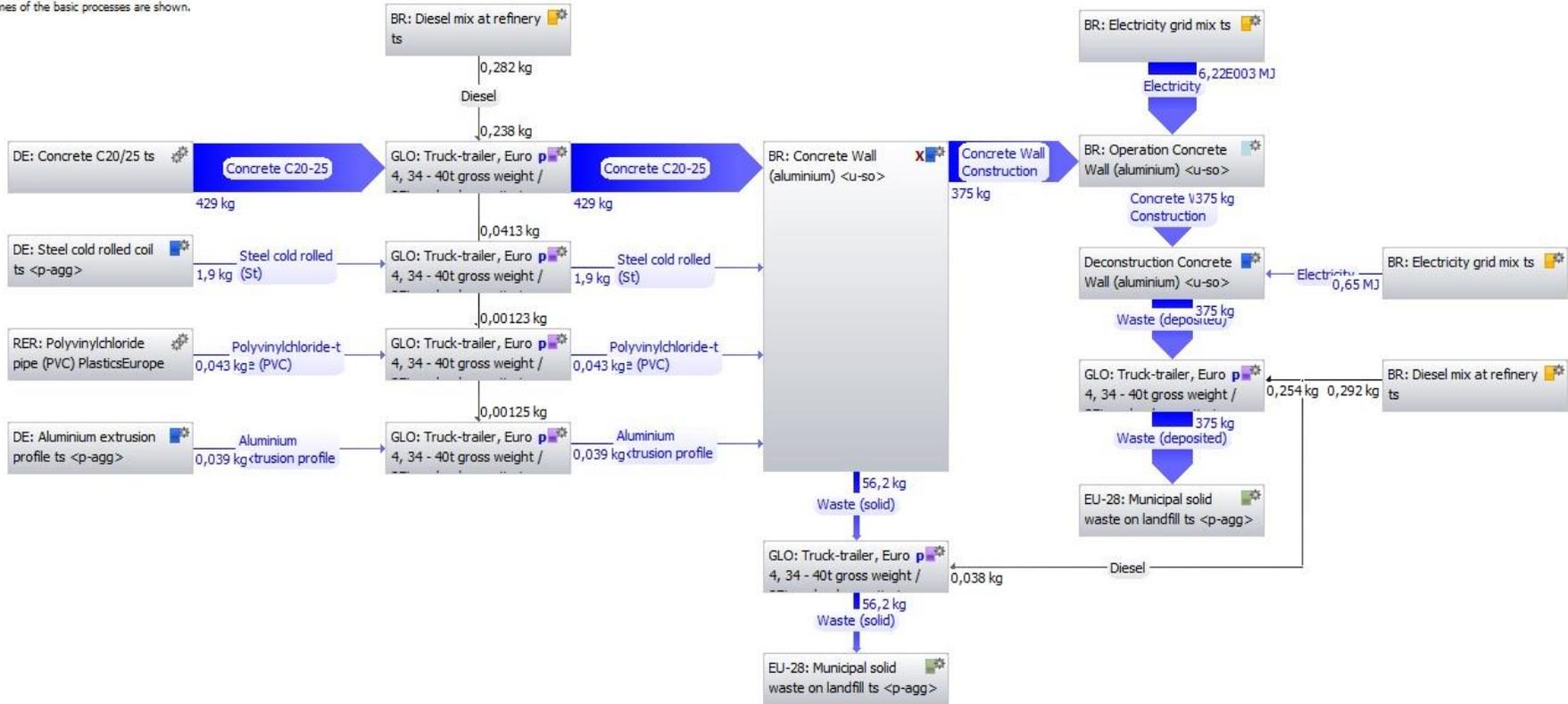
SISTEMA CONVENCIONAL	Local da Fábrica	Distância de Transporte (km)	Quantidade (kg)	Litros de Diesel	Energia (MJ)	Litros/UF	Emissões (kgCO ₂ -eq/m ²)
Bloco cerâmico furado 9cm	Rondonópolis - MT	934	14001,366	355,702	12627,418	2,806	5,769
Cimento	Votorantim Sobradinho - DF	27,6	6254,045	4,695	166,674	0,037	0,076
Areia	Ipameri - GO	294	29962,484	239,604	8505,942	1,890	3,886
Cal	Votorantim Sobradinho - DF	27,6	885,073	0,664	23,588	0,005	0,011
Concreto 25MPa	Concrecon Brasília - DF	20,5	8173,354	4,557	161,790	0,036	0,074
Aço (5mm)	Gerdau Divinópolis - MG	805	20,591	0,451	16,005	0,004	0,007
Aço (10mm)	Gerdau Divinópolis - MG	805	223,319	4,890	173,588	0,039	0,079
Chapa de madeira compensada plastificada (2200x12x1100 mm)	União da Vitória - PR	1490	394,628	15,993	567,769	0,126	0,259
Resíduos da construção	Brasília - DF	25	80,570	0,055	1,945	0,0004	0,001

APÊNDICE G: Fluxograma do sistema de Parede de Concreto (PC) com fôrma de alumínio no software GaBi.

LCA Concrete Wall (Aluminium)

Process plan: Mass [kg]
The names of the basic processes are shown.

Selection: LCA Concrete Wall [...]

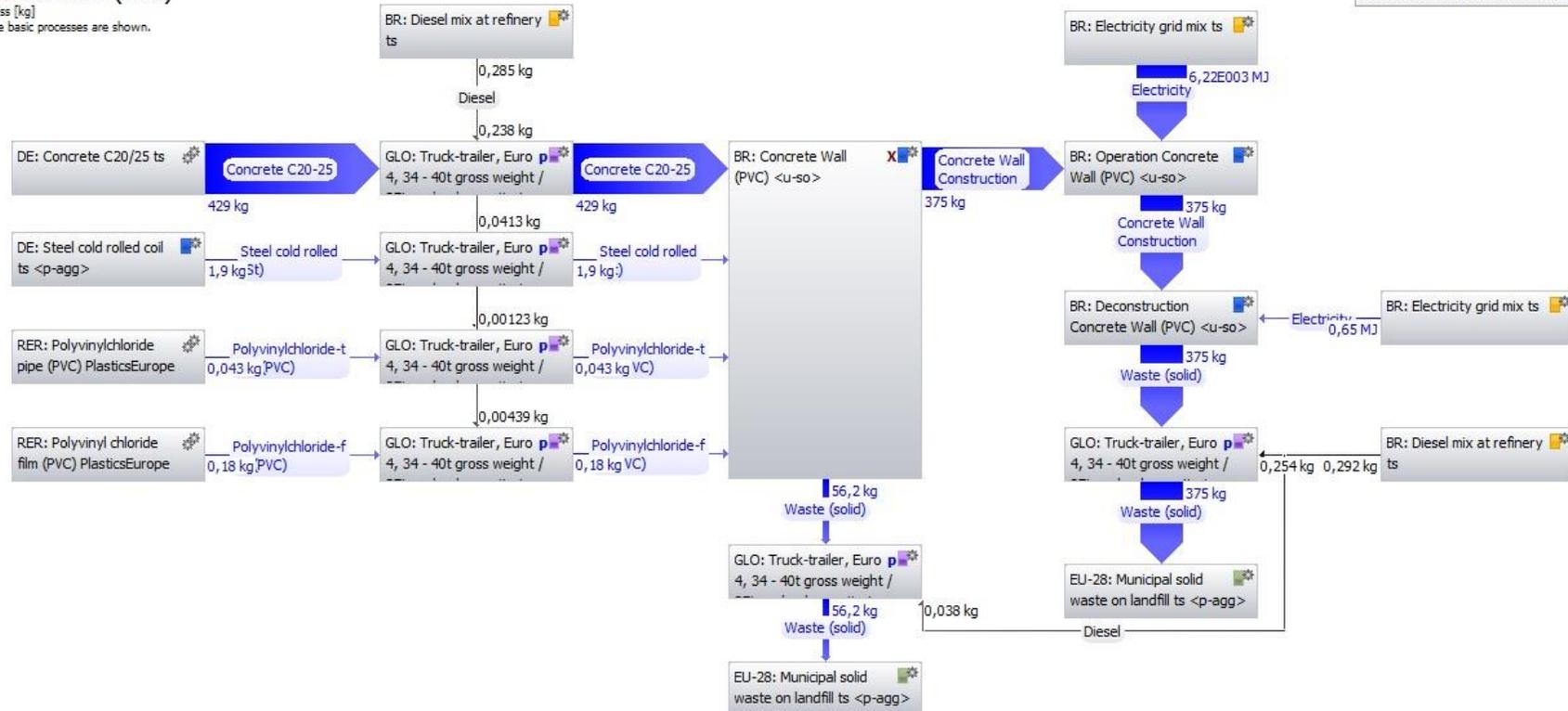


APÊNDICE H: Fluxograma do sistema de Parede de Concreto (PC) com fôrma de PVC no software GaBi.

LCA Concrete Wall (PVC)

Process plan: Mass [kg]
The names of the basic processes are shown.

Selection: LCA Concrete Wall [...]



APÊNDICE J: Fluxograma do sistema de Vedação Convencional (VC) no software GaBi.

