

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Arthur Ferreira de Araujo

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE
VIDA E DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
COBERTURA USUAIS EM HABITAÇÕES DE INTERESSE
SOCIAL**

Porto Alegre

Dezembro de 2019

Arthur Ferreira de Araujo

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE
VIDA E DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
COBERTURA USUAIS EM HABITAÇÕES DE INTERESSE
SOCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ana Carolina Badalotti Passuello

Porto Alegre

Dezembro de 2019

Arthur Ferreira de Araujo

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE
VIDA E DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
COBERTURA USUAIS EM HABITAÇÕES DE INTERESSE
SOCIAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

PhD. Ana Carolina Badalotti Passuello
Phd pela *Universitat Rovira i Virgili / ES*
Orientadora

Dr.^a Luciani Somensi Lorenzi
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr.^a Michele Ferreira Dias Morales
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Ivana e Fábio, e ao meu irmão Francisco, por todo amor e suporte que me permitiram chegar até aqui.

À prof.^a Ana Carolina Badalotti Passuello, pela orientação, ensinamentos, empenho, disponibilidade, atenção aos detalhes, e também, por ter sido a grande catalisadora do desenvolvimento de minha paixão pelo conhecimento científico, minha eterna gratidão.

Ao grupo de ACVistas do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), pelo respaldo encontrado nos momentos de maior dificuldade e, também, pela alegria compartilhada nos momentos de conquistas.

Às professoras e aos professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por todo aprendizado e dedicação recebidos durante minha formação. Em especial: às professoras Ana Paula Kirchheim, Angela Borges Masuero, Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Vanessa Fátima Pasa Dutra, Ângela Gaio Graeff e Luciani Somensi Lorenzi e; aos professores João Ricardo Masuero, Miguel Aloysio Sattler, José Alberto Azambuja e Fernando Mainardi Fan.

Aos amigos, fundamentais na vida de qualquer um, muito obrigado por tudo.

PREFÁCIO

Este trabalho foi estruturado a partir do *template* para submissão de artigos da revista Ambiente

Construído disponível em:

<<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/about/submissions#onlineSubmissions>>

RESUMO

A construção civil consome 50% dos recursos naturais e 40% dos insumos energéticos mundiais. Boa parte desses impactos está atribuída às edificações. No âmbito de Habitação de Interesse Social (HIS) brasileira, o programa Minha Casa, Minha Vida se destaca com mais de 4 milhões de unidades entregues. Entretanto, pouca atenção é dada ao impacto ambiental e ao consumo energético dessas HISs. Desde 2013, as novas edificações habitacionais devem atender aos requisitos de Desempenho Térmico (DT) da NBR 15.575. Sabe-se que o DT está relacionado à eficiência termoenergética de edificações, sendo o Sistema de Cobertura (SC) um ponto chave para essa melhoria. Visto isso, este trabalho objetiva quantificar impactos ambientais incorporados ao ciclo de vida (berço ao portão) de SCs usuais do setor de HIS brasileiro, considerando SCs de mesmo DT de acordo com a NBR 15.575. Abordam-se 4 cenários base representativos de HISs e 4 cenários onde foi proposta a inclusão do isolante térmico Poliestireno Expandido (EPS), visando melhorar o DT dos SCs. Sete categorias de impacto são avaliadas utilizando para cálculo o software *OpenLCA* v.1.9. Resultados apontam que SCs com materiais cimentícios em sua composição são mais impactantes, sendo o aumento médio nos impactos devido à inclusão de EPS de 15%.

Palavras-Chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Sistema de Cobertura. Impacto Ambiental.

Desempenho Térmico. Isolante Térmico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases de uma avaliação do ciclo de vida	4
Figura 2 – Cenários base dos sistemas de coberturas	6
Figura 3 – Etapas do ciclo de vida	7
Figura 4 – Sistema de produto estudado	8
Figura 5 – Impactos incorporados potenciais para 1 m ² de sistema de cobertura com parcelas de contribuição de cada material para os diferentes cenários considerados	10

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios e níveis de desempenho de coberturas quanto à transmitância térmica	3
Tabela 2 – Composição dos cenários avaliados, suas transmitâncias térmicas (U) segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005) e seus desempenhos de acordo com a NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b)	6
Tabela 3 – Conjunto de dados utilizados para a estimativa de impactos dos materiais ...	8

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Categorias de impacto utilizadas	9
---	---

LISTA DE SIGLAS

ACEEE – American Council for an Energy-Efficient Economy

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ADP-f – Depleção Abiótica para Recursos Fósseis

ADP-nf – Depleção Abiótica para Recursos Não-Fósseis

AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

AP – Acidificação de Solo e Água

CC – Construção Civil

DAPs – Declarações Ambientais de Produtos

DT – Desempenho Térmico

EP – Eutrofização

EPS – Poliestireno Expandido

FV – Fator de Ventilação

GWP – Mudança Climática

HIS – Habitação de Interesse Social

ITC – Inteligência Empresarial da Construção

ODP – Depleção da camada de ozônio

PMCMV – Programa Minha Casa, Minha Vida

POCP – Formação de ozônio troposférico

RoW – *Rest-of-the-World*

SC – Sistema de Cobertura

TC – Telha Cerâmica

TCPO – Tabelas de Composições de Preços para Orçamento

TF – Telha de Fibrocimento

UF – Unidade Funcional

UR – Unidade de Referência

ZB – Zona Bioclimática

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Fator de absorvância do telhamento

R_{se} – Resistência térmica da camada de ar adjacente externa

R_{si} – Resistência térmica da camada de ar adjacente interna

R_T – Resistência térmica total

U – Transmitância térmica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1 Desempenho térmico	2
2.1.1 Norma de desempenho	3
2.2 Metodologia de avaliação do ciclo de vida	4
3 MÉTODO	5
3.1 Elaboração dos cenários	5
3.2 Metodologia de avaliação do ciclo de vida	7
3.2.1 Objetivo e escopo	7
3.2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)	7
3.2.2.1 Delimitações	9
3.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida	9
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	12

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA E DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE COBERTURA USUAIS EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

ASSESSMENT OF LIFE-CYCLE ENVIRONMENTAL IMPACTS AND OF THERMAL PERFORMANCE OF ROOFING SYSTEMS USED IN SOCIAL HOUSING

RESUMO

A construção civil consome 50% dos recursos naturais e 40% dos insumos energéticos mundiais. Boa parte desses impactos está atribuída às edificações. No âmbito de Habitação de Interesse Social (HIS) brasileira, o programa Minha Casa, Minha Vida se destaca com mais de 4 milhões de unidades entregues. Entretanto, pouca atenção é dada ao impacto ambiental e ao consumo energético dessas HISs. Desde 2013, as novas edificações habitacionais devem atender aos requisitos de Desempenho Térmico (DT) da NBR 15.575. Sabe-se que o DT está relacionado à eficiência termoenergética de edificações, sendo o Sistema de Cobertura (SC) um ponto chave para essa melhoria. Visto isso, este trabalho objetiva quantificar impactos ambientais incorporados ao ciclo de vida (berço ao portão) de SCs usuais do setor de HIS brasileiro, considerando SCs de mesmo DT de acordo com a NBR 15.575. Abordam-se 4 cenários base representativos de HISs e 4 cenários onde foi proposta a inclusão do isolante térmico Poliestireno Expandido (EPS), visando melhorar o DT dos SCs. Sete categorias de impacto são avaliadas utilizando para cálculo o software *OpenLCA* v.1.9. Resultados apontam que SCs com materiais cimentícios em sua composição são mais impactantes, sendo o aumento médio nos impactos devido à inclusão de EPS de 15%.

Palavras-Chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Sistema de Cobertura. Impacto Ambiental. Desempenho Térmico. Isolante Térmico.

ABSTRACT

Construction industry consumes 50% of world natural resources and 40% of world energy inputs. In the Brazilian Social Housing (SH) context, My House My Life program stands out with over 4 million units handed in. However, little attention is paid to the environmental impact and energy consumption of these SHs. Since 2013, Brazilian new residential buildings must meet NBR 15.575 Thermal Performance (TP) requirements. It is known that the TP relates to the thermo-energetic efficiency of buildings, and the Roofing System (RS) is a key point for improvements. Therefore, this work aims to quantify the life cycle embodied environmental impacts (cradle-to-gate) of common RS adopted in Brazilian SHs, considering RSs with the same TP according to NBR 15.575. Four SH representative base scenarios are studied alongside with another four scenarios where the inclusion of Expanded Polystyrene (EPS), a thermal insulator, was proposed aiming to improve the TP of the RSs. Seven impact categories are evaluated using *OpenLCA* v.1.9 software for calculation. Results indicate that RSs with cementitious materials in their composition are more impactful, as the average increase in impacts due to the inclusion of EPS revolves around 15%.

Keywords: Life Cycle Assessment. Roofing System. Environmental Impact. Thermal Performance. Thermal Insulation.

1 INTRODUÇÃO

A influência da Construção Civil (CC) nos danos causados ao meio ambiente não pode mais ser ignorada (SHARMA et al., 2011). Há anos já se conhece a magnitude dos impactos desse setor, que, no mundo, é responsável por consumir 50% dos recursos naturais e 40% dos insumos energéticos de todas as fontes (TAVARES, 2006). Além disso, a CC também é responsabilizada diretamente por 6,4% das emissões globais de gases causadores do efeito estufa e 12% indiretamente, quando consideradas as emissões relacionadas ao consumo de eletricidade e condicionamento artificial (UNEP, 2014). Já é consensual, portanto, a necessidade de redução dos impactos do setor. Uma boa parcela desses impactos da CC está atribuída às edificações, permitindo que essas reduções sejam alcançadas através de escolhas ambientalmente conscientes dos materiais e sistemas construtivos que as compõem.

Houve, nos últimos anos, aumento nas preocupações sobre os impactos ambientais das edificações devido ao crescimento da demanda de habitações, principalmente em países emergentes, como o Brasil. No âmbito da Habitação de Interesse Social (HIS) brasileira, o Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), regulamentado pela Lei 11.977 (BRASIL, 2009), se destaca. Lançado há mais de 10 anos como uma estratégia do governo federal para reduzir o déficit habitacional, o programa já entregou, de acordo com dados da Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2019), cerca de 4 milhões de moradias, tendo 1,5 milhão de unidades contratadas ainda não entregues.

No entanto, pouca atenção ainda é dada ao impacto ambiental e ao consumo energético dessas HISs. Prevalencem critérios econômicos para aprovação dos projetos atuais, os quais desatendem ao Desempenho Térmico (DT) dos materiais, dos sistemas e da edificação como um todo (MONTES, 2016). Sabe-se que o maior impacto de uma edificação se dá durante o seu uso e que decisões de projeto, como a escolha dos materiais, influenciam significativamente nos impactos ambientais de uso das edificações (AYUSO; CALCEDO, 2018; MORAGA, 2017; SHARMA et al., 2011). No trabalho desenvolvido por Morales et al. (2019), foram avaliados os impactos ambientais para 7 categorias de avaliação de impacto ao longo do ciclo de vida de duas tipologias do PMCMV, unifamiliar (casa) e multifamiliar (apartamento). Foram consideradas as etapas de manufatura de produtos, construção, uso e fim de vida das tipologias. Resultados apontam que, para 6/7 categorias, a fase de uso apresentou-se como a mais impactante, sendo a energia operacional representativa de 40 a 68% da contribuição total dos impactos. Reguly et al. (2017) avaliou um sistema de vedação do PMCMV em alvenaria de bloco cerâmico, e reporta resultados similares atrelados à etapa de uso com participação média de 60,6% para as mesmas categorias. De modo geral, sistemas simples e que não consistem em grandes impactos incorporados, como os adotados no PMCMV, tendem a implicar em impactos significativos na fase de uso (DIXIT et al., 2012), além de terem desempenho energético desfavorecido. Por outro lado, sistemas mais complexos que buscam melhor desempenho energético da edificação, a partir de materiais isolantes, por exemplo, apesar de poder apresentar impacto incorporado maior, tendem a reduzir os impactos de uso e conseqüentemente os impactos totais quando considera-se todo o ciclo de vida da edificação.

As edificações são compostas por sistemas que, conforme definição da NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a), são o “conjunto de componentes e elementos destinados a cumprir com uma macrofunção [...] (exemplo: fundação, estrutura, [...], cobertura).” Em climas quentes, sabe-se que boa parte do fluxo de calor adentra as edificações através do Sistema de Cobertura (SC) (PERALTA, 2006), principalmente quando se tratam de edificações térreas, onde cerca de 80% do calor que chega na envoltória provém deste sistema (MASCARÓ, 1991). No Brasil, segundo dados do último Censo, realizado em 2010, para habitações particulares permanentes urbanas considerando todas as faixas de renda, cerca de 85% das unidades habitacionais são casas, enquanto que 12,5% são apartamentos (IBGE, 2011).

A NBR 15.575-1 (ABNT, 2013a) trata do desempenho das novas edificações habitacionais e considera as fases construtiva e de uso da edificação, levando em conta requisitos elaborados pensando-se nos usuários. Os requisitos são divididos em exigências de segurança, sustentabilidade e habitabilidade de maneira a melhorar a qualidade das edificações habitacionais. Dentre os requisitos de habitabilidade, há o de DT, que quando garantido, pode possibilitar uma melhor eficiência termoenergética ao longo da vida útil da edificação. Estudos como o de Montes (2016) evidenciam a necessidade de melhoria do desempenho termoenergético dos projetos do PMCMV que vêm sendo executados, e os SCs são um ponto chave para essa melhoria. Sabe-se que quando uma edificação é concebida pensando-se no desempenho durante seu ciclo de vida, o uso racional de energia é promovido (LAMBERTS et al., 2007; SHARMA et al., 2011).

Segundo Ayuso e Calcedo (2018), é importante gerar meios que facilitem a seleção de soluções construtivas baseadas em seus impactos ambientais. Para realizar seleções ambientalmente conscientes a fim de minimizar as emissões e os consumos energéticos, é necessário conhecer os impactos atrelados aos materiais e sistemas das edificações. Nesse sentido, a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), regulamentada pela série NBR ISO 14.040-14.049 (ABNT, 2009a, 2009b, 2014, 2016), permite avaliar o desempenho ambiental por meio da quantificação dos impactos de produtos. A ACV avalia todas as etapas do ciclo de vida da edificação, considerando desde a extração das matérias-primas, fase de construção e uso, até o fim de vida da edificação. Com essa quantificação, é possível, dentre outras aplicações, identificar oportunidades para redução de impactos ambientais.

Medeiros, Durante e Callejas (2018) estudaram a contribuição nos impactos ambientais dos sistemas construtivos de um edifício institucional de ensino público federal, construído na cidade de Primavera do Leste, MT, de 2 pavimentos e área total de 4.347,57 m². Foi feita uma ACV do berço ao portão avaliando-se os impactos, em 7 categorias, dos sistemas de fundação, superestrutura, vedações, cobertura, esquadrias e revestimentos da edificação. Seus resultados indicam que os sistemas mais impactantes foram: superestrutura, cobertura e vedações. Além disso, os autores também apontam limitações conhecidas referentes à “inexistência de metodologias de avaliação de impacto do ciclo de vida e base de dados de inventário desenvolvidos para a realidade brasileira [...]” o que confere incertezas a estudos desse tipo a nível nacional.

Visto isso, este estudo objetiva avaliar a aplicação da ACV como ferramenta de apoio à tomada de decisão quanto a escolha de SCs de HISs brasileiras. Avaliam-se os impactos ambientais incorporados do ciclo de vida de SCs mais usuais do setor, frente a requisitos de DT da NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b). É feita uma abordagem com cenários base, representativos do setor de HIS, e com cenários onde foi proposta a inclusão de placas de Poliestireno Expandido (EPS), material com propriedades isolantes, aos cenários base. Busca-se, com isso, contribuir com o embasamento de tomadores de decisão, permitindo escolhas mais conscientes no que se refere a sistemas e materiais de coberturas, uma vez que se conhecerá um pouco melhor sobre seus impactos e suas emissões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Desempenho térmico

Quando se trata de DT, diversas propriedades térmicas dos componentes de um SC são consideradas importantes. Dentre elas, a transmitância térmica (U), detalhada na seção seguinte, a capacidade térmica e o atraso térmico. Segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005), a capacidade térmica, ou inércia térmica, é a “quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema” e de certa forma, tem o potencial de controlar a amplitude de temperaturas nos interiores das edificações (LAMBERTS et al., 2016). Já o atraso térmico é o “tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta [...]”, e depende da capacidade

térmica do componente construtivo, nesse caso, do SC, e da ordem em que as camadas dos materiais estão dispostas.

De maneira a permitir que edificações padronizadas e com baixa complexidade, como as do PMCMV, sejam analisadas objetiva e agilmente quanto a seus DTs, sem recorrer ao método da simulação computacional, é imprescindível uma metodologia simplificada de avaliação (CHVATAL, 2014). A NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b) traz essa metodologia simplificada baseada prioritariamente na propriedade de transmitância térmica. Estudos como os de Brito et al. (2012) e Marques, Chvatal (2013) apontam certas incoerências entre os diferentes métodos propostos por essa norma, simplificado e simulação computacional. Entretanto, este trabalho limita-se ao método simplificado da norma para avaliação dos níveis de desempenho dos SCs, visto que o foco principal é avaliar os impactos ambientais potenciais dos SCs estudados.

2.1.1 Norma de desempenho

Por definição da norma de desempenho para SCs, NBR 15.575-5, o SC é o:

Conjunto de elementos / componentes, dispostos no topo da construção, com as funções de assegurar estanqueidade às águas pluviais e salubridade, proteger demais sistemas da edificação habitacional ou elementos e componentes da deterioração por agentes naturais, e contribuir positivamente para o conforto termoacústico da edificação habitacional. (ABNT, 2013b, p. 5).

A seguir são apresentados pela Tabela 1 os critérios que a mesma norma considera para avaliar os níveis de DT pelo método simplificado. O nível de desempenho é definido em função da avaliação da transmitância térmica do SC estudado atentando-se à Zona Bioclimática (ZB) em que se encontra a edificação. O nível de desempenho é classificado em mínimo (M), intermediário (I) e superior (S), conforme expresso na tabela. Atualmente são definidas 8 ZBs no Brasil pela NBR 15.220 (ABNT, 2005), a qual abrange também um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas às HISs para cada zona específica.

Tabela 1 – Critérios e níveis de desempenho de coberturas quanto à transmitância térmica.

Transmitância térmica (U) W/m ² K					
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8 ¹⁾		Nível de desempenho
U ≤ 2,3	α ¹⁾ ≤ 0,6	α ¹⁾ > 0,6	α ¹⁾ ≤ 0,4	α ¹⁾ > 0,4	M
	U ≤ 2,3	U ≤ 1,5	U ≤ 2,3 FV	U ≤ 1,5 FV	
U ≤ 1,5	α ¹⁾ ≤ 0,6	α ¹⁾ > 0,6	α ¹⁾ ≤ 0,4	α ¹⁾ > 0,4	I
	U ≤ 1,5	U ≤ 1,0	U ≤ 1,5 FV	U ≤ 1,0 FV	
U ≤ 1,0	α ¹⁾ ≤ 0,6	α ¹⁾ > 0,6	α ¹⁾ ≤ 0,4	α ¹⁾ > 0,4	S
	U ≤ 1,0	U ≤ 0,5	U ≤ 1,0 FV	U ≤ 0,5 FV	

¹⁾ Na zona bioclimática 8 também estão atendidas coberturas com componentes de telhas cerâmicas, mesmo que a cobertura não tenha forro.

NOTA O fator de ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220/2.

Fonte: NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b, tabela I.4).

A transmitância térmica U é calculada pelo inverso da resistência térmica total (RT) do SC, conforme expresso pela Equação 1. A RT é dada pelo somatório das resistências térmicas de cada componente do SC acrescidas das resistências superficiais das camadas de ar adjacentes externa (R_{se}) e interna (R_{si}). Percebe-se, na Tabela 1, que são também considerados na análise o fator de absorvância

(α) do telhamento, para ZB 3-8, e o Fator de Ventilação (FV), para as ZB 7 e 8. A absorvância é dada em função da cor da telha adotada enquanto que o FV é calculado em função do tamanho das aberturas de ventilação nos beirais dos SC. Como esse detalhe construtivo não está no escopo do trabalho, adotou-se $FV = 1$, apesar das transmitâncias estarem calculadas para áticos ventilados, o que resultaria em um $FV > 1$.

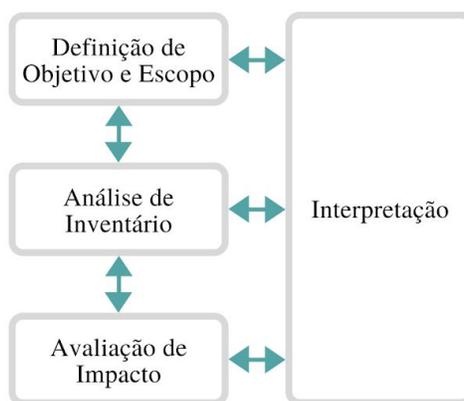
$$U = \frac{1}{RT} \quad \text{Eq. 1}$$

Apesar dessa abordagem normativa considerar apenas essas propriedades térmicas, ressalta-se que, dentre outras, a capacidade térmica e o atraso térmico também são tidas como propriedades importantes na avaliação de desempenho, conforme comentado. Cabe destacar que telhas cerâmicas e telhas de fibrocimento são amplamente empregadas em SCs de HISs brasileiras (MONTES, 2016). Segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005) e Lamberts et al. (2016), apesar desses tipos de telhas apresentarem transmitâncias térmicas muito parecidas ($U = 4,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ para telha cerâmica de 1 cm de espessura; $U = 4,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ para telha de fibrocimento de 0,8 cm de espessura (LABEEE, 2019)), elas possuem DT significativamente diferente devido principalmente à telha cerâmica ser porosa e permitir a absorção de água (de chuva ou de condensação). Esse fato auxilia na redução do fluxo de calor que adentra as edificações com telhas cerâmicas, uma vez que parte desse calor é dissipado nos processos de aquecimento e evaporação da água contida nos poros.

2.2 Metodologia de avaliação do ciclo de vida

A ACV é normatizada pelas ISO 14.040-14.049 (ABNT, 2009a, 2009b, 2014, 2016) e é dividida em 4 fases, conforme ilustrado pela Figura 1. São elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação. De acordo com Lamberts et al. (2007), ferramentas para avaliação da sustentabilidade de edifícios, como a ACV, podem servir como “[...] guia de orientação na escolha de alternativas construtivas e tecnológicas de menor impacto ao meio ambiente” podendo ser de grande auxílio para tomadores de decisão, como projetistas e construtores.

Figura 1 – Fases de uma avaliação do ciclo de vida.



Fonte: adaptado de NBR ISO 14.040 (ABNT, 2009a).

O escopo de um estudo de ACV e seu grau de detalhamento podem variar bastante conforme os objetivos do estudo, é nele que se determina a profundidade da abordagem que será feita. O objetivo indica a aplicação pretendida e seu público-alvo. Nessa fase, devem-se definir: sistema de produto e fronteiras, Unidade Funcional (UF) ou Unidade de Referência (UR), metodologia de avaliação de impactos, requisitos de qualidade dos dados, dentre outras.

A fase de análise de inventário do ciclo de vida envolve a coleta de dados, de entrada e saída dos sistemas, necessários para alcance dos objetivos. Nessa fase, são realizadas as quantificações pertinentes aos dados, que costumam ser trabalhosas, muitas vezes em função da dificuldade de se obter todas as informações necessárias. No caso das edificações, pelo seu alto nível de complexidade e por utilizar uma gama de produtos, pode ser difícil levantar dados de toda cadeia produtiva. Além disso, os dados de produtos, processos ou atividades podem ser de diferentes naturezas: matéria-prima, transporte, emissões, energia, entre outros.

A fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) visa prover informações para o melhor entendimento da significância ambiental do sistema de produto avaliado. São elementos obrigatórios: identificação das categorias de impacto, classificação das relações de inventário com problemas ambientais e a caracterização (quantificação do prejuízo). A normativa europeia BS EN 15.804 (CEN, 2014) versa sobre sustentabilidade de obras de construção e determina regras globais de categorias de impacto para Declarações Ambientais de Produtos (DAPs) de construção. Por essa norma, são exigidas as seguintes categorias de avaliação de impacto para as DAPs: depleção abiótica para recursos fósseis (ADP-f) e não-fósseis (ADP-nf), acidificação de solo e água (AP), eutrofização (EP), mudança climática (GWP), depleção da camada de ozônio (ODP) e formação de ozônio troposférico (POCP), calculadas a partir do método CML(2001).

Já a fase de interpretação é comum a todas as fases anteriores. Nesse momento, são realizadas avaliações das constatações de análise de inventário e avaliação de impacto frente aos objetivos e escopo definidos, visando fornecer recomendações ao público-alvo.

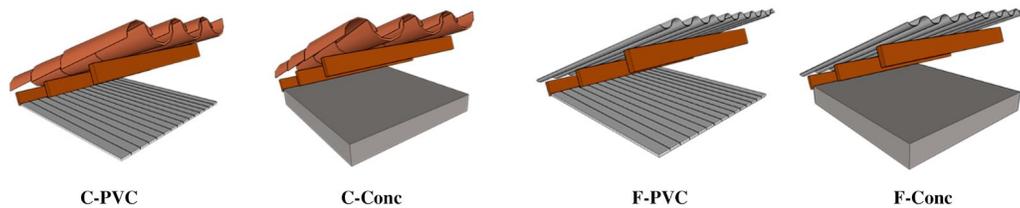
3 MÉTODO

3.1 Elaboração dos cenários

Buscou-se elaborar cenários de SCs com a melhor representatividade do setor de HIS. Para tanto, os SCs abordados neste estudo tiveram embasamento na tese de doutorado de Montes (2016), na qual grandes esforços foram dirigidos para a elaboração de projetos representativos de HISs a nível nacional. Sua amostragem considerou cerca de 200 projetos aprovados recentemente para as diferentes faixas do PMCMV em todas as regiões brasileiras. Investigou-se projetos com o maior número de unidades habitacionais de empresas com destaque entre as que constroem para o Programa, sendo que a maioria das construtoras se encontravam entre as primeiras do *ranking* ITC (ITC, 2013). Foram levantadas as principais tipologias por faixa do programa, bem como identificados os materiais mais utilizados em seus sistemas, incluindo o SC. Para as tipologias levantadas de casas, unifamiliares e geminadas, o SC foi composto de Telha Cerâmica (TC), ático, estrutura em madeira e forro em PVC ou em laje, maciça ou mista, de concreto. Já para as tipologias multifamiliares, com plantas em 'H' ou lineares, o SC foi composto de Telha de Fibrocimento (TF), ático, estrutura metálica e forro em laje maciça de concreto.

A partir dessas informações foram elaborados os cenários base deste estudo, ilustrados pela Figura 2, compostos por combinações entre dois tipos de telhamento, cerâmico e de fibrocimento, e dois tipos de forro, PVC e em laje de concreto maciça com espessura de 10 cm. Considerou-se, para todos os cenários, a estrutura portante dos telhamentos em madeira. A nomenclatura dos cenários segue o seguinte padrão: a primeira letra refere-se ao tipo de telha, 'C' e 'F' para cenários com telha cerâmica e de fibrocimento respectivamente e; as letras seguintes referem-se ao tipo de forro, 'PVC' e 'Conc' para cenários com forro em PVC e laje de concreto, na devida ordem.

Figura 2 – Cenários base dos sistemas de coberturas.



Fonte: Projeteer (LABEEE, 2019).

Apesar de os projetos do PMCMV serem replicados em diversas regiões do Brasil sem as devidas adaptações para cada zona bioclimática (MONTES, 2016), verificou-se, a partir das transmitâncias térmicas, procedimento simplificado da norma, que esses 4 cenários base atendiam somente aos requisitos mínimos¹ de DT da NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b) para 2/8 zonas bioclimáticas, ZB 1 e 2. Buscando atender ao requisito de DT da norma para todas as zonas bioclimáticas, sem recorrer à simulação computacional, foi proposta a inclusão de mais 4 cenários, estes com placas de EPS com 2,5 cm de espessura. O EPS é um material com propriedades isolantes, fácil de ser encontrado e compatível com os sistemas de cobertura estudados. Essa medida assegura, para os cenários com EPS, níveis de desempenho superior para ZB 1 e 2, e intermediários para as demais, ZB 3-8. A Tabela 2, a seguir, resume essas informações, onde salienta-se que os cenários com EPS estão identificados com ‘EPS’ no final.

Tabela 2 – Composição dos cenários avaliados, suas transmitâncias térmicas (U) segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005) e seus desempenhos de acordo com a NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b).

Cenário*	Composição**	Transmitância Térmica (U)*** [W/m ² K]	Desempenho	
			ZB 1 e 2	ZB 3-8
C-PVC	Telha cerâmica 1 cm ($\alpha > 0,6$) Forro PVC 1 cm	1,75	Mínimo	Não atende (procedimento simplificado)
C-Conc	Telha cerâmica 1 cm ($\alpha > 0,6$) Forro em laje maciça de concreto 10 cm	2,05		
F-PVC	Telha de fibrocimento 0,8 cm ($\alpha > 0,6$) Forro PVC 1 cm	1,76		
F-Conc	Telha de fibrocimento 0,8 cm ($\alpha > 0,6$) Forro em laje maciça de concreto 10 cm	2,06		
C-PVC-EPS	Telha cerâmica 1 cm ($\alpha > 0,6$) Placa de EPS 2,5 cm; Forro PVC 1 cm	0,8	Superior	Intermediário
C-Conc-EPS	Telha cerâmica 1 cm ($\alpha > 0,6$) Placa de EPS 2,5 cm Forro em laje maciça de concreto 10 cm	0,9		
F-PVC-EPS	Telha de fibrocimento 0,8 cm ($\alpha > 0,6$) Placa de EPS 2,5 cm; Forro PVC 1 cm	0,8		
F-Conc-EPS	Telha de fibrocimento 0,8 cm ($\alpha > 0,6$) Placa de EPS 2,5 cm Forro em laje maciça de concreto 10 cm	0,9		

Fonte: Autor (2019).

¹ Considerou-se que a absorvância (α) de ambos tipos de telhamento é: $\alpha > 0,6$. Valores de acordo com a literatura (ABNT, 2005; SILVEIRA; MARINOSKI; LAMBERTS, 2012).

* Inclinações de 22,5° e 4,3° para os cenários com TC e TF, na devida ordem, segundo Montes (2016).

** Todos os cenários estudados possuem estrutura em madeira e ático ventilado.

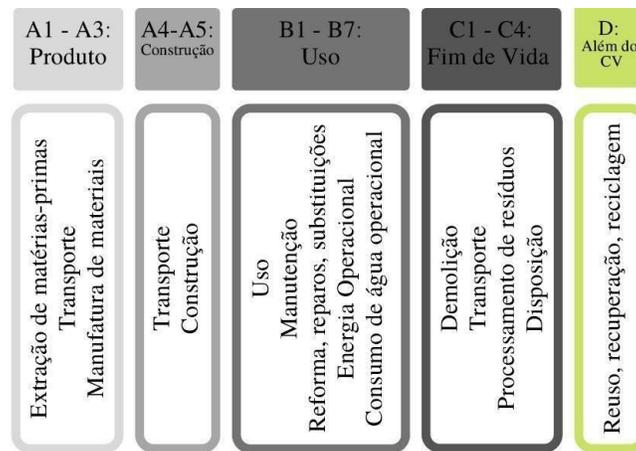
*** Os valores das transmitâncias térmicas (U) obtidos na calculadora disponível no site do Projeteer (LABEEE, 2019).

3.2 Metodologia de avaliação do ciclo de vida

3.2.1 Objetivo e escopo

A Figura 3 apresenta as etapas do ciclo de vida de um estudo de ACV. Sabe-se que a fase de uso, módulos B1-B7, contribui significativamente nos impactos totais, podendo chegar a mais de 50% dos impactos dependendo da categoria e cenários de manutenção considerados (MORAGA, 2017), e, além disso, os consumos energéticos dessa fase são diretamente associados ao DT da edificação. Entretanto, devido à alta complexidade atrelada a uma abordagem mais completa, e considerando que o estudo aborda apenas SCs e não uma edificação, este estudo delimitou-se aos módulos A1-A3, ou seja, teve uma abordagem *cradle-to-gate* (do berço ao portão das fábricas). Em outras palavras, foram estimados apenas os impactos incorporados, de produção, dos materiais utilizados nos SCs descritos pela Tabela 2. Adotou-se uma UR no lugar de uma UF visto que os SCs possuem DTs diferentes. A UR definida foi 1 m² de SC.

Figura 3 – Etapas do ciclo de vida.



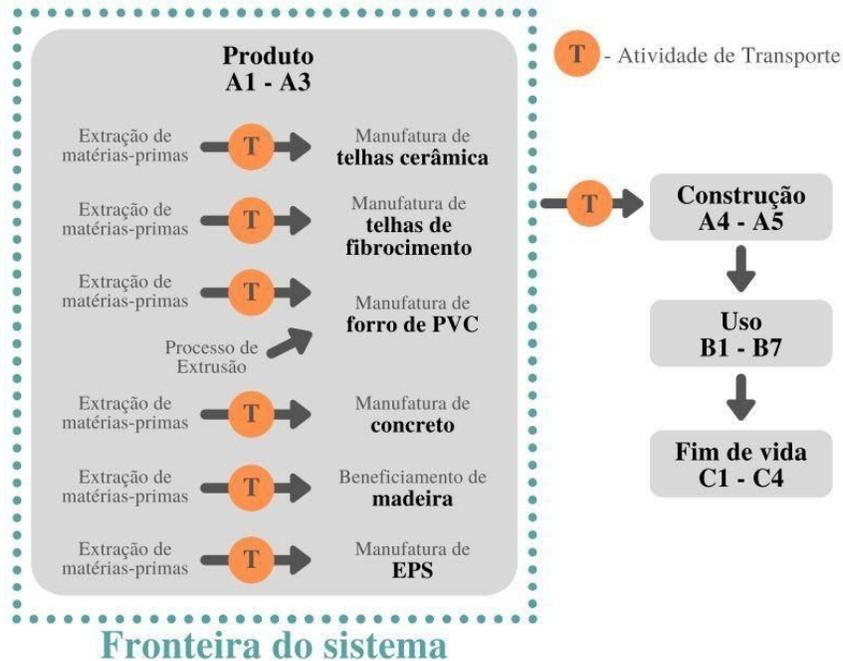
Fonte: Adaptado de BS EN 15.804 (CEN, 2014).

Segundo a NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b), “Comparações entre sistemas devem ser feitas com base na(s) mesma(s) função(ões), quantificadas pelas mesmas unidades funcionais [...]”. Das funções dos SCs descritas anteriormente, avalia-se aqui a de contribuir para o conforto térmico, ou seja, pelo DT avaliado pela NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b). Os DTs dos cenários avaliados são diferentes. Portanto, apesar de todos os cenários de SCs descritos na Tabela 2 serem avaliados para a mesma UR, seus impactos são comparáveis entre si apenas quando os SCs possuírem DTs similares dados em função de suas transmitâncias térmicas. Tendo isso em vista, considera-se que são comparáveis os resultados entre dois grupos de cenários de mesmo DT: (i) cenários sem isolamento (C-PVC, C-Conc, F-PVC e F-Conc) e; (ii) cenários com isolamento (C-PVC-EPS, C-Conc-EPS, F-PVC-EPS e F-Conc-EPS).

3.2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)

A Figura 4 ilustra o sistema de produto estudado, a fronteira do sistema e os materiais considerados nos SCs.

Figura 4 – Sistema de produto estudado.



Fonte: Autor (2019).

Os quantitativos dos materiais foram embasados nas Tabelas de Composições de Preços para Orçamento TCPO 15ª edição (PINI, 2017), bem como em catálogos de fornecedores, nos casos em que não havia equivalência nas composições das TCPO. Os conjuntos de dados de ICV provêm em sua maioria diretamente da base *Ecoinvent* v.3.6 (ECOINVENT, 2019) e, no caso da telha cerâmica, do relatório de adaptação de dados, utilizando a base *Ecoinvent* para dados de *background*, mas com adaptações fundamentadas em informações da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) para o mercado brasileiro (LAFONTAINE et al., 2012), conforme explicitado pela Tabela 3. Foram utilizados dados com localização geográfica brasileira quando disponíveis (telha cerâmica e concreto) por representarem maior confiabilidade para este estudo, enquanto que os dados dos demais materiais utilizados possuem localização geográfica *Rest-of-the-World* (RoW), obtidos através de extrapolações da base de produções para o resto do mundo. Para o forro de PVC, uma adaptação foi realizada devido à ausência desse dado na base. A adaptação consistiu-se em compor um *dataset* (conjunto de dados) combinando um processo de extrusão com a matéria-prima do PVC.

Tabela 3 – Conjunto de dados utilizados para a estimativa de impactos dos materiais.

Material	Nome do conjunto de dados	Fonte
Telha cerâmica	<i>Clay roof tile, BR</i>	Relatório de adaptação de dados (LAFONTAINE et al., 2012)
Telha de fibrocimento	<i>Fibre cement facing tile production, RoW</i>	<i>Ecoinvent</i> v3.6 (ECOINVENT, 2019)
Forro PVC	<i>Extrusion, plastic pipes, RoW;</i> <i>Polyvinylchloride production, suspension polymerisation, RoW</i>	
Concreto	<i>Concrete, all types to generic market for concrete, normal strength, BR</i>	
Madeira	<i>Beam, hardwood, raw, air drying to u=20%, RoW</i>	
EPS	<i>Polystyrene foam slab for perimeter insulation, RoW</i>	

Fonte: Autor (2019).

3.2.2.1 Delimitações

A estrutura portante do forro de PVC e o aço da armadura da laje de concreto não foram considerados no escopo da ACV. Considerou-se que, se a estrutura portante do PVC fosse em madeira, sua quantidade não seria tão representativa quanto a estrutura portante dos telhamentos. Já para o aço, como forma de simplificação, optou-se por não entrar no mérito do dimensionamento das armaduras, relacionado ao projeto estrutural dos empreendimentos, apesar disso, na discussão dos resultados obtidos, uma consideração é feita sobre essa simplificação.

3.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida

Os impactos foram estimados por categorias de avaliação de impacto do método CML (2001), desenvolvido pela *Leiden University* seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b). Esse método estima os impactos nas 7 categorias recomendadas pela BS EN 15.804 (CEN, 2014), que estabelece regras para DAPs de CC. O Quadro 1 descreve as categorias abordadas e suas respectivas unidades de medida. A plataforma de avaliação de impactos do ciclo de vida utilizada foi o *Software* gratuito *OpenLCA* v1.9 (GREENDELTA, 2019).

Quadro 1 – Categorias de impacto utilizadas.

Sigla	Categoria de impacto	Unidade
ADP-f	Depleção abiótica para recursos fósseis	MJ
ADP-nf	Depleção abiótica para recursos não-fósseis	kg Sb eq.
AP	Acidificação de solo e água	kg SO ₂ eq.
EP	Eutrofização	kg (PO ₄) ³⁻ eq.
GWP	Mudança climática	kg CO ₂ eq.
ODP	Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq.
POCP	Formação de ozônio troposférico	kg C ₂ H ₄ eq.

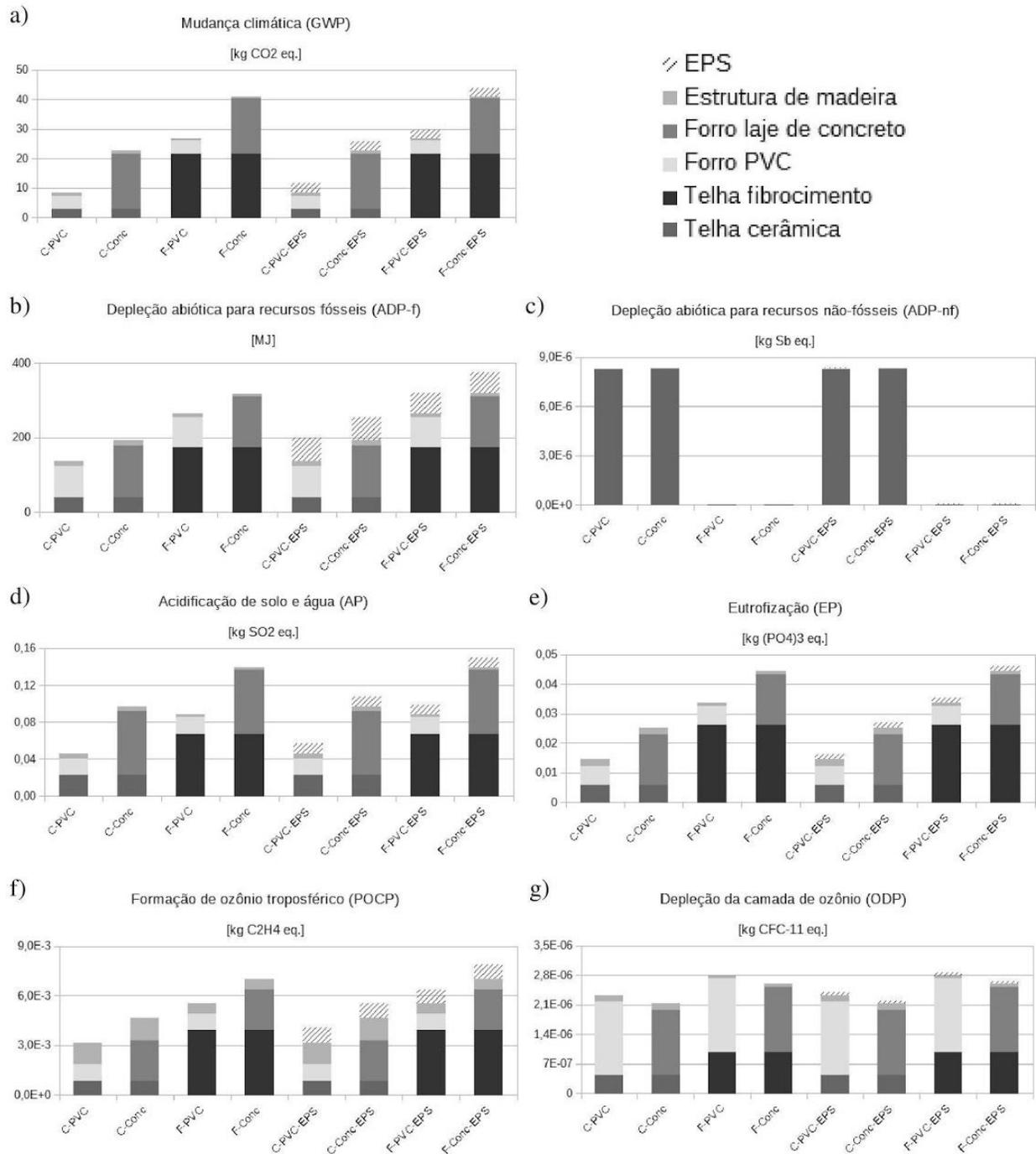
Fonte: Adaptado de BS EN 15.804 (CEN, 2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os impactos potenciais apresentados pela Figura 5 estão calculados considerando a UR de 1 m² de sistema de cobertura para 7 categorias de avaliação de impacto, pelo método CML (2001), conforme já mencionado. Ressalta-se, ainda, que os 4 cenários que não possuem placa de EPS são representativos dos SCs usuais do PMCMV, enquanto que nos demais cenários, foi proposta a inclusão de placas de EPS, material isolante térmico, aos cenários iniciais, visando atender aos requisitos mínimos de transmitância térmica exigidos pelo método simplificado da NBR 15.575-5 (ABNT, 2013b) para todas as ZBs brasileiras definidas pela NBR 15.220 (ABNT, 2005).

Para todas as categorias, optou-se por ordenar os resultados da seguinte forma: primeiramente são apresentados os resultados dos cenários sem isolamento e, posteriormente, os cenários com isolamento. Ressalta-se que a estrutura portante do forro de PVC e o aço da armadura da laje de concreto ficaram ambos fora da fronteira do sistema aqui estudado. Como cada categoria de impacto possui sua unidade, as escalas dos gráficos diferem entre si.

Figura 5 – Impactos incorporados potenciais para 1 m² de sistema de cobertura com parcelas de contribuição de cada material para os diferentes cenários considerados.



Fonte: Autor (2019).

Percebe-se em quase todas as categorias abordadas, à exceção da depleção abiótica para recursos não-fósseis (Fig. 5c), que os cenários com TFs apresentam maior impacto em relação aos cenários com TCs. Para as inclinações das coberturas (4,3° para fibrocimento e 22,5° para cerâmica) levantadas como representativas do PMCMV, sabe-se que o peso das TCs é cerca de 2,5 vezes o peso

das TFs para a UR de 1 m² de SC. Apesar disso, nota-se que a TF apresenta valores de impactos maiores nas 6/7 categorias avaliadas. Esse fato pode estar atrelado à significativa quantidade de cimento presente nessa telha. Sabe-se que a produção do cimento é intensamente energética, principalmente pela produção do clínquer, a qual possui também processos altamente emissivos. No estudo de Frazão, Fernandes e Peneda (2004), que avaliou o ciclo de vida de dois tipos de TFs, com fibras de amianto e com fibras de Polivinil Álcool (PVA), o processo de produção do cimento usado das telhas foi responsável por impactos de 75 a 80% para descarga de partículas inorgânicas respiráveis e de 45 a 62% para o consumo de combustíveis fósseis.

Na maioria das categorias, à exceção de duas (depleção da camada de ozônio (Fig. 5g) e depleção abiótica para recursos não-fósseis (Fig. 5c)), a laje de concreto apresentou maior impacto em relação ao forro de PVC. Apesar de o aço da armadura do concreto não ter sido considerado no inventário, seus impactos costumam ser significativos, pois sua contribuição de impacto em proporção ao seu valor mássico tende a ser alta (MORAGA, 2017). Portanto, essa diferença nos impactos dos tipos de forro estudados tende a ser ainda maior.

Em 5/7 categorias, (à exceção de depleção abiótica para recursos não-fósseis (Fig. 5c) e depleção da camada de ozônio (Fig. 5g)), os dois materiais mais impactantes são a TF e a laje em concreto. Para os impactos de mudança climática e de depleção abiótica para recursos fósseis (Fig. 5a,b), esse comportamento é esperado, pois ambas categorias são diretamente influenciadas pelo uso de combustíveis fósseis (MORAGA, 2017). Para o concreto, dois fatores contribuem para esses impactos, sua expressiva representação mássica e a presença do cimento, fator que é válido também para a TF. Processos que contribuem significativamente para esses impactos são o uso dos combustíveis fósseis para a calcinação do calcário, usado na fabricação do cimento presente nesses materiais, e a liberação de CO₂ durante a clinquerização do clínquer, componente do cimento.

A categoria depleção abiótica para recursos não-fósseis (Fig. 5c) representa os impactos das extrações de diferentes tipos de materiais do ambiente natural, como de depósitos e reservas, considerando suas disponibilidades. Para essa categoria, o impacto da TC foi expressivamente superior aos demais materiais atingindo valores com duas ordens de magnitude maiores que o segundo material mais impactante na categoria, a TF. Esse fato pode estar atrelado aos processos de transporte e à extração da argila, matéria prima da TC, de suas reservas naturais. Sabe-se que a bibliografia não é exatamente clara no que deveria refletir essa categoria de depleção de recursos (ILCD, 2011).

A quantidade de madeira nas estruturas portantes variou devido às diferenças de peso e de inclinação dos telhamentos estudados. Em volume de madeira, essa diferença foi cerca de 2 vezes maior para os cenários com TCs em relação aos cenários com TFs, e pode ser percebida nos gráficos da Figura 5, principalmente na categoria formação de ozônio troposférico (Fig. 5f), onde a contribuição da estrutura portante nos impactos foi mais significativa. Para essa categoria, a madeira representou de 23 a 41% dos impactos nos cenários com TCs e de 08 a 11% dos impactos nos cenários com TFs.

Em média, nos 4 cenários propostos que possuem placa de EPS, C-PVC-EPS, C-Conc-EPS, F-PVC-EPS e F-Conc-EPS, os impactos referentes a essa camada de isolamento foram de 13,2% para cenários com TCs e de 11,0% para cenários com TFs, não se caracterizando como os maiores contribuintes dos impactos totais. O aumento médio nos impactos foi de 16,7% para os cenários com TCs e de 13,2% para os cenários com TFs. Apesar disso, em algumas categorias, esse aumento representou parcelas maiores de contribuição do EPS, como na categoria depleção abiótica para recursos fósseis (Fig. 5b) em que os acréscimos médios para cenários com TCs e TFs foram de 37,7% e 19,5%, respectivamente. Ademais, para a categoria formação de ozônio troposférico (Fig. 5f) os acréscimos médios devido à inclusão da camada isolante foram de 24,1% e 13,5% para cenários com

TCs e TFs, na devida ordem. O isolamento de coberturas é considerado um dos principais elementos de regulação térmica de edifícios residenciais e comerciais pelo *American Council for an Energy-Efficient Economy* (ACEEE) (RODRIGUES, 2015). Visto mais isso, deduz-se que o emprego de materiais isolantes, como as placas de EPS, em SCs de projetos de HISs pode trazer benefícios no que refere ao DT das edificações sem o aporte significativo de impactos ambientais incorporados. Além disso, considerando tanto a regulação térmica promovida pelos materiais isolantes quanto as demais etapas do ciclo de vida das edificações, onde a fase de uso representa parcela significativa nos impactos, utilizar materiais isolantes em SCs podem trazer benefícios quanto ao uso racional da energia a nível nacional, visto a provável diminuição da demanda de condicionamento artificial e, conseqüentemente, de eletricidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os impactos potenciais dos cenários representativos do setor de HIS brasileiro obtidos neste trabalho mostraram que os SCs com telhamentos em cerâmica são menos impactantes de uma maneira geral do que os SCs com telhamentos de fibrocimento, tendência que se mantém para os cenários com EPS. Do ponto de vista do DT, ambos telhamentos possuem transmitâncias térmicas muito semelhantes. Entretanto, como a TC possui a aptidão de absorver água em seus poros, e uma capacidade térmica superior à da TF, SCs com TCs apresentam melhor controle das temperaturas interiores.

Quanto aos impactos ambientais dos tipos de forro estudados, a laje de concreto apresentou maior impacto em relação ao forro em PVC. Percebe-se que, de uma maneira geral, foram significativos os impactos estimados para os materiais com cimento em sua composição, concreto e TF, como já esperado, ao passo que os impactos da estrutura portante em madeira não foram muito significativos.

No geral, os acréscimos nos impactos devidos à inclusão das placas de EPS foram pequenos, em torno de 15% em média. Os cenários propostos com a inclusão de EPS possuem, na categoria mais impactante, em média 28 % mais impacto, porém vale ressaltar que seus DTs são superiores aos cenários sem EPS. Ressalta-se também que os valores das transmitâncias térmicas dos cenários propostos com isolamento equivalem a menos de 50% do valor das transmitâncias térmicas dos cenários base, sem isolamento.

Dentre os cenários estudados, considerando a avaliação dos impactos ambientais frente ao DT dos SCs estudados, o cenário que melhor se porta é o C-PVC-EPS, com telha cerâmica, forro em PVC e isolamento com EPS.

Apesar deste estudo possuir simplificações, pôde-se ter uma ideia de como os impactos ambientais se distribuem nos SCs estudados. E com isso, evidencia-se a importância da ACV como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Espera-se que essas contribuições possam incentivar e embasar a adoção de medidas que visem melhorar o DT de projetos futuros de HISs brasileiras, bem como estudos mais aprofundados e detalhados sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220** – Desempenho Térmico de Edificações, 2005.

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

2009a.

_____. **NBR ISO 14044** – Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações, 2009b.

_____. **NBR 15575-1** – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais, 2013a.

_____. **NBR 15575-5** – Edificações habitacionais – Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas, 2013b.

_____. **NBR ISO 14049** – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário, 2014.

_____. **NBR ISO 14047** – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto, 2016.

AYUSO, Manuel J. Carretero; CALCEDO, Justo García Sanz. Comparison between building roof construction systems based on the LCA. **Revista de la Construcción**, v. 17, n. 1, p. 123–136, 2018.

BRASIL, República Federativa Do. Lei 11.977. **Diário Oficial da União – DOU**, 2009. Disponível em: <<https://legis.senado.leg.br/norma/580200/publicacao/15748477>>

BRITO, Adriana C. De et al. Contribuições para o aprimoramento da NBR 15.575 referente ao método simplificado de avaliação de desempenho térmico de edifícios. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2012, **Anais**.

CEN. EN 15804 – Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. **European Committee for Standardization, Brussels, Belgium**, 2014.

CHVATAL, Karin Maria Soares. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 119–134, 2014.

CML – Institute of Environmental Science. **CML's impact assessment methods and characterization factors**. Leiden University. Leiden, 2001. Disponível em: <<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/index.html>>.

CNM, Confederação Nacional dos Municípios. **CNM – Análise de 10 anos do PMCMV**. 2019. Disponível em: <<https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/cnm-faz-analise-dos-10-anos-do-minha-casa-minha-vida>>. Acesso em: 10 out. 2019.

DIXIT, Manish K. et al. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review

paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 3730–3743, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021>>

ECOINVENT. **Ecoinvent v.3.6 database**. 2019. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/>>.

FRAZÃO, Rui; FERNANDES, Rui; PENEDA, Constança. Análise Comparativa do Ciclo de Vida de Fibrocimento AT e Fibrocimento NT. [s. l.], n. 514, 2004.

GREENDELTA. **OpenLCA v.1.9.0**. 2019. Disponível em: <<https://www.openlca.org/>>.

IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características da população e dos domicílios: resultados do universo**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>.

ILCD. **ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context**, 2011.

ITC. **Ranking ITC**. 2013. Disponível em: <<http://www.rankingitc.com.br/>>.

LABEEE. **Projeteee**. 2019. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/componentes-construtivos/#pisos-e-coberturas>>. Acesso em: 10 set. 2019.

LAFONTAINE, Mia et al. **Análise comparativa do Ciclo de Vida das Telhas Cerâmicas versus Telhas de Concreto**. Disponível em: <www.quantis-intl.com>

LAMBERTS, Roberto et al. Sustentabilidade nas edificações: contexto internacional e algumas referências brasileiras na área. **LabEEE – UFSC**, p. 1–21, 2007. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/sustentabilidade_nas_edificacoes_contexto_internacional_e_alguas_referencias_brasileiras_na_areasustentabilidade_nas_edificacoes_contexto_internacional_e_alguas_referencias_brasileiras_na_area.pdf>

LAMBERTS, Roberto et al. **Desempenho térmico de edificações**, 2016.

MARQUES, Tassia H. T.; CHVATAL, Karin M. S. A review of the Brazilian NBR 15575 Standard: Applying the simulation and simplified methods for evaluating a social house thermal performance. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN 2013, **Anais**.

MASCARÓ, Lúcia E. R. **Energia na edificação - Estratégia para minimizar o seu consumo - 2ª Ed.** São Paulo: Editora Projeto Editores Associados Ltda, 1991.

MEDEIROS, Larissa Mendes; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolonio. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 365–385, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200259>>

MONTES, Maria Andrea Triana. **Abordagem Integrada no Ciclo de Vida de Habitação de Interesse Social Considerando Mudanças Climáticas**, 2016. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE MARIA ANDREA TRIANA.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_MARIA_ANDREA_TRIANA.pdf)>

MORAGA, Gustavo Longaray. **Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida**, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2017.

MORALES, Michele & Moraga, Gustavo & Kirchheim, A. & Passuello, Ana. (2019). **Regionalized inventory data in LCA of public housing: a comparison between two conventional typologies in southern Brazil**. Journal of Cleaner Production. 238. 117869. 10.1016/j.jclepro.2019.117869.

PERALTA, Gizela. **Desempenho Térmico de Telhas: Análise de Monitoramento e Normalização Específica**, 2006.

PINI. **Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos – 15ª Edição**, 2017.

REGULY, Natalia P. et al. ACV DE EDIFICAÇÕES DO PROGRAMA MINHA CASA MINHA VIDA (PMCMV): impactos relacionados à etapa de manutenção. In: VI SICS 2017, **Anais**.

RODRIGUES, Marcus Vinicius de Paiva. Avaliação Da Eficiência Energética De Edificações Residenciais Em Fase De Projeto: Análise De Desempenho Térmico Pelo Método Prescritivo E Por Simulação Computacional Aplicados a Estudo De Caso De Projeto-Tipo Do Exército Brasileiro. **UNICAMP, Campinas – SP**, [s. l.], p. 132, 2015.

SHARMA, Aashish et al. Life cycle assessment of buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 871–875, 2011.

SILVEIRA, Ricardo; MARINOSKI, Deivis Luis; LAMBERTS, Roberto. Avaliação da absorção à radiação solar e temperatura superficial de telhas de edificações do campus da UFSC. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2012, **Anais**.

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2006. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/TESE_Sergio_Fernando_Tavares.pdf>

UNEP. **Intergovernmental Panel on climate change (IPCC) - Summary for Policymakers and Technical Summary**. UNEP DTIE, Sustainable Consumption & Production Branch, 15 Rue de Milan, 75441 Paris CEDEX 09, France, 2014.