

EMISSÕES DE CO₂ NA CASA POPULAR EFICIENTE E O EMPREGO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS

Cássia Laire Kozloski (cakozloski@gmail.com); Marcos Alberto Oss Vaghetti (marcos.vaghetti@ufsm.br); Bibiana Noschang da Silva (bibinoschang@hotmail.com)

Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo (UFSM-PPGAUP) - Brazil

Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia (UFSM-CT) - Brazil

Palavras chave: construção civil, sustentabilidade, emissões de CO₂, quantificação de CO₂

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) por ações antrópicas são uma das principais responsáveis pelo fenômeno do aquecimento global, provocando preocupantes mudanças nos ecossistemas da Terra. Dentre os principais contribuintes para a intensificação do efeito estufa, a construção civil encontra-se em busca de ações de mitigação para os impactos ambientais provocados pelo setor, especialmente no que diz respeito à produção e uso dos materiais de construção. Nesse sentido, o presente trabalho busca estimar a quantificação de emissões de CO₂ de materiais empregados na construção de duas residências de igual projeto arquitetônico na cidade de Santa Maria - RS, Brasil, sendo uma com especificação de materiais usuais no setor, nominada edificação padrão, e a Casa Popular Eficiente (CPE), com emprego de materiais alternativos, para posterior comparação entre as quantificações finais. O método QE-CO₂ em seu Nível Básico foi utilizado, por ser adaptado ao contexto da construção, produção e indústria brasileiros, contabilizando nas estimativas as fases de extração de matéria prima, transporte e produção dos materiais. Considerando-se o fator de perda para cada um dos materiais analisados, a quantificação de emissões para a CPE totalizou 12,737 tCO₂, enquanto que para a edificação padrão se constatou 14,218 tCO₂. Dentre os materiais, a madeira utilizada para as esquadrias demonstrou redução de 90,65% das emissões em relação ao mesmo produto em alumínio, da mesma forma que a telha ecológica Tetra Pak, com 61,3% menos liberação de CO₂ para a atmosfera em comparação com as telhas de material cerâmico. Assim, comprova-se que o emprego de materiais alternativos é eficaz quando da necessidade de diminuição das emissões de CO₂, devendo ser considerado para as construções futuras, requisito básico para entender a diminuição dos impactos ambientais como uma necessidade atual.

1. INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno natural, necessário para a manutenção da vida na terra, e responsável por captar e reter parte da energia emitida pelo Sol (DIAS, 2002; MATTOS; GRANATO, 2010). Entretanto, o aumento crescente e excessivo da concentração de moléculas dos gases causadores do efeito estufa (GEE), com atual liberação maior que a quantidade absorvida pelos sistemas naturais, em destaque o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), resulta em maior retenção da quantidade de calor na atmosfera (DIAS, 2002; MATTOS e GRANATO, 2010; ROTHSCHILD, 2007), causando o fenômeno do aquecimento global.

Considerado como um dos maiores desafios da sociedade moderna quanto aos impactos ambientais (GAN et al, 2017), o aquecimento global tornou-se um dos tópicos principais das discussões internacionais (LI; CHENG, 2017). Dias (2002), Li e Cheng (2017) alertam sobre a capacidade desse fenômeno em modificar as características globais do clima, e afirmam que as consequências sociais, ambientais, econômicas e éticas/culturais causadas pelas

mudanças consequentes compõem um conjunto de problemas que já estão sendo vivenciados e devem ser enfrentados pela sociedade humana.

Pereira (2014) afirma que as mudanças climáticas da atualidade são causadas principalmente pela utilização majoritária de fontes energéticas poluentes, fomentadas pelos processos industriais. Nesse sentido, o setor da construção civil destaca-se como um dos maiores contribuintes de emissões de GEE entre as fontes antropogênicas (GAN et al, 2017), principalmente no que diz respeito a produção dos materiais para a construção das edificações (LI et al, 2013; LI; CHENG, 2017; RASMUSSEN et al., 2018), resultando da soma entre extração da matéria prima, transporte e manufatura do material.

1.1. Impactos ambientais, emissões de CO₂ e construção civil

A expansão urbana vivenciada hoje, ainda recente quando comparada ao surgimento da sociedade moderna, alterou irreversivelmente as paisagens, agravando os problemas ambientais nas cidades (DIAS, 2002). De acordo com Dias (2002), as discussões sobre as questões ambientais urbanas são negligenciadas, principalmente no que diz respeito ao consumo de recursos naturais, podendo comprometer os objetivos sociais, econômicos e ambientais em todos os países.

A demanda por edificações mais sustentáveis tornou-se sujeito principal de estudos e pesquisas de forma enfática a partir de 1995, quando a influência da ação antrópica sobre as mudanças climáticas, principalmente no que diz respeito àquelas relativas ao aquecimento global, foi indicada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 1995), grupo criado em 1988 pela ONU com a participação de mais de 2 mil cientistas. Segundo Burke e Keeler (2010), entre os anos de 1950 a 2000, as emissões de CO₂ pelas edificações superou o dobro do valor inicial em comparação ao transporte e indústria, o que se deve, principalmente ao uso de fontes de energia poluentes e extração intensa de matéria prima do ambiente (PEREIRA, 2014).

Em 2002, a Agenda 21 para construções sustentáveis em países em desenvolvimento – um documento em discussão -, posterior à Agenda 21 para Construções Sustentáveis, de 1999, ambas resultantes de discussões realizadas no Rio de Janeiro durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento – ECO-92, em 1992, enfatizou a atribuição de responsabilidade à todas as partes envolvidas no processo da construção civil, como os usuários, empreiteiras, projetistas e investidores (DU PLESSIS, 2002). De acordo com Agopyand e John (2011), um dos maiores desafios iminentes em resposta a esse documento é a execução de medidas de prevenção imediatas, bem como a preparação e mudanças na cadeia produtiva em todos os níveis e de forma sistemática, para que ocorra a efetiva evolução do processo.

Entretanto, a relação entre as mudanças climáticas e a ação do homem só foi consolidada em 2007, intensificando a preocupação dos órgãos governamentais e exigindo mudanças nos padrões de produção e consumo (mppc), já indicadas durante a ECO-92. O relatório de 2007 do IPCC surgiu como um divisor de águas aos antigos relatórios, confirmando suposições de reuniões anteriores, expondo, com 95% de certeza científica, que as atividades humanas são as responsáveis pelas alterações climáticas atuais (IPCC, 2007). Ainda, corroborando as indicações do IPCC de 1995, o documento de 2007 apontou que 76,7% dos gases do efeito estufa liberados por ações antrópicas correspondem ao CO₂, e 7,9% decorrem de atividades da construção civil (IPCC, 2007).

Agopyan e John (2011) destacam a queima de combustíveis fósseis para fabricação e transporte de materiais, decomposição térmica do calcário e a extração e uso de madeira nativa como combustível ou material como as três principais fontes de emissões de GEE relativo aos materiais de construção. Nesse sentido, Burke e Keeler (2010) apresentam a redução das emissões de CO₂ pela construção civil como um grande desafio, visto que a

edificação e todas as fases do seu processo de construção estão entre os grandes responsáveis pelas emissões, e, em um futuro próximo, esse desafio se tornará uma necessidade, uma obrigação social e política indiscutível.

Essas mudanças representam, principalmente para os países emergentes, através de investimento em infraestrutura com consequente redução de emissões de carbono nos processos de produção, um potencial econômico a longo prazo, exigindo o empenho dos governos no desenvolvimento de legislações adequadas e formas de controle e fiscalização eficientes (DOW; DOWNING, 2007; MATTOS; GRANATO, 2010; VALLE, 2002).

No Brasil, a introdução dos conceitos de desenvolvimento sustentável na construção é recente, podendo-se considerar como marco inicial desse processo o simpósio do Conselho Internacional para a Pesquisa e Inovação em Construções - CIB - sobre Construção e Meio Ambiente – da teoria para a prática, ocorrido em 2000. Entretanto, a formação de uma entidade a nível nacional surgiu somente sete anos depois, com a criação do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), buscando desenvolver e implementar conceitos e práticas mais sustentáveis em todas as dimensões do desenvolvimento sustentável na cadeia produtiva da indústria da construção civil (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Em resposta, criou-se a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009, oficializando o compromisso nacional voluntário para a mitigação de emissões de gases causadores do aquecimento global excessivo, estabelecendo metas para 2020 (BRASIL, 2009). Essa mesma lei salienta a necessidade e objetiva compatibilizar o desenvolvimento econômico e social nacional às questões ambientais, bem como a mitigação das emissões antrópicas de diferentes fontes desses gases.

Desse modo, a realização de um inventário de emissões de GEE, além de possibilitar a autoavaliação de instituições e organizações e demonstrar a preocupação com questões ambientais, permite identificar de forma consistente as principais etapas de produção de um material onde deve-se mitigar o desprendimento desses gases, sobretudo o dióxido de carbono (FUJIHARA; LOPES, 2009). Apesar de ainda voluntário no Brasil, os autores defendem que essa quantificação deve fazer parte das atividades rotineiras de uma empresa ou organização (FUJIHARA; LOPES, 2009), afim de contribuir para o desenvolvimento da mesma em concordância com as necessidades vigentes no mercado e indústria a nível mundial.

Ainda, deve-se considerar que os impactos ambientais causados por um mesmo material podem variar, pois está condicionado a diversos fatores, como distâncias e modalidade de transporte, condições do uso durante a construção e práticas adotadas após a vida útil dos produtos (AGOPYAN; JOHN, 2011). Por isso, a avaliação do ciclo de vida integral de um produto é fundamental para que se obtenha a avaliação dos seus impactos de forma concreta e integral, o que requer dos sistemas de transformação da matéria prima e produção o investimento em pesquisas para obtenção de dados referentes ao assunto, ainda incipiente no Brasil.

A necessidade de sistemas de certificação ou de diretrizes de sustentabilidade compulsórios, antes mesmo de que haja a necessidade, e não opção, de uma construção menos impactante ambientalmente é defendida por Burke e Keeler (2010). De acordo com os autores, uma edificação sustentável representa qualidade do projeto e ambiente, fazendo com que as mudanças necessárias no setor por uma demanda ambiental influenciem positivamente o ambiente construído, beneficiando o usuário (BURKE; KEELER, 2010).

1.2. A Casa Popular Eficiente

A Casa Popular Eficiente (CPE), demonstrada nas Figuras 1 e 2, é um protótipo de habitação de interesse social (HIS) construído no Campus Sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), utilizando materiais e soluções sustentáveis, como tijolos de solo-cimento, telhas onduladas Tetra Pak, impermeabilizantes ecológicos, tintas de terra, entre outros (VAGHETTI et al., 2013). Ainda, foram implantadas medidas passivas de condicionamento térmico, reaproveitamento da água da chuva, aquecimento solar da água de banho e tratamento in loco das águas cinzas, buscando minimizar os impactos ambientais causados pela produção de energia elétrica e destinação de efluentes (VAGHETTI et al., 2013).



Figura 1. Perspectiva frontal da Casa Popular Eficiente



Figura 2. Perspectiva lateral da Casa Popular Eficiente

Resultado de uma extensa pesquisa iniciada em 2008 na Universidade Luterana do Brasil (ULBRA Santa Maria/ Curso de Arquitetura e Urbanismo) e continuada pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Tecnologias Sustentáveis (GEPETECS) do Curso de Engenharia Civil da UFSM, o protótipo, foi inaugurado em 2013, demonstrando a possibilidade e viabilidade da construção de HIS que contemple em sua integridade soluções econômicas e ecologicamente sustentáveis (VAGHETTI; SANTOS; CARISSIMI, 2015).

2. OBJETIVOS

Visando difundir o conhecimento e uso de materiais de construção menos agressivos ao meio ambiente, o presente trabalho busca quantificar de forma estimada as emissões de CO₂ dos materiais de construção empregados na construção do protótipo da CPE, utilizando como referencial de comparação as quantificações estimadas de uma residência projetada com materiais usuais da construção civil brasileira, também realizadas pelo estudo apresentado. Atribui-se, assim, para os resultados a função da quantificação desse gás como um indicador de sustentabilidade na dimensão ambiental.

3. METODOLOGIA

Nesse trabalho, a identificação de emissões de CO₂ associadas aos materiais construtivos ocorre por meio do método QE-CO₂, proposto por Costa (2012). A escolha por essa ferramenta de quantificação de CO₂ baseou-se no desenvolvimento da mesma para os materiais da construção civil em um contexto nacional, e considera na contagem as fases de extração das matérias primas, transporte e produção de materiais empregado em uma edificação.

O método QE-CO₂ foi criado a partir de dados do IPCC, da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC), da 2ª Comunicação Nacional do Brasil, do Balanço Energético Nacional, de artigos científicos, de associações, de fabricantes e das metodologias já existentes a nível mundial (COSTA, 2012). O procedimento foi dividido em

três níveis, que utilizam como premissa uma fórmula geral (equação 1), adaptativa para particularidades de cada material, e são determinados pela quantidade e qualidade dos dados disponíveis para determinado material, resultando em dados com diferentes precisões.

$$Emissões_{MT1,j} = QT_j \times FP_j \times (Emissões_{TR1,i} + Emissões_{EN1,i}) \quad (1)$$

Onde:

- $Emissões_{MT1,j}$: emissões de CO₂ devido a utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO₂
- QT_j : quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas
- FP_j : fator de perda do produto j, adimensional
- $Emissões_{TR1,i}$: emissões de CO₂ devido ao consumo da energia i para o transporte de matérias primas e do produto j para a edificação, em toneladas de CO₂/tonelada de produto j
- $Emissões_{EN1,i}$: emissões de CO₂ devido ao consumo da energia i para extração e processamento do produto j necessário na edificação, em toneladas de CO₂/tonelada de produto j

Para aplicação no presente trabalho, o Nível Básico foi executado, baseando-se em dados médios, sem detalhamento, a nível nacional de consumos energéticos e composição química dos materiais, além de meio de transporte e/ou distâncias indeterminados, produzindo estimativas menos precisas de emissões de CO₂. Assim, esse nível é utilizado quando pode-se determinar de forma precisa somente a quantidade de material empregado em uma determinada obra, e dados como fatores de perda (FP) e fatores de emissões de CO₂ de um produto no Brasil (FEPj) são retirados do conjunto de dados compilados pelo autor (COSTA, 2012).

4. RESULTADOS

4.1. Características das edificações a serem analisadas

A CPE localiza-se no Centro de Eventos da UFSM, no bairro Camobi, na cidade de Santa Maria - RS. Com a construção concluída em 2013 e com sistemas passivos de conforto térmico contemplados pelo projeto arquitetônico, a edificação térrea possui área útil de 55,42m², distribuídos entre sala de estar, cozinha, área de serviço, um banheiro e dois dormitórios, como observa-se nas figuras 3 e 4 (VAGHETTI et al., 2013).

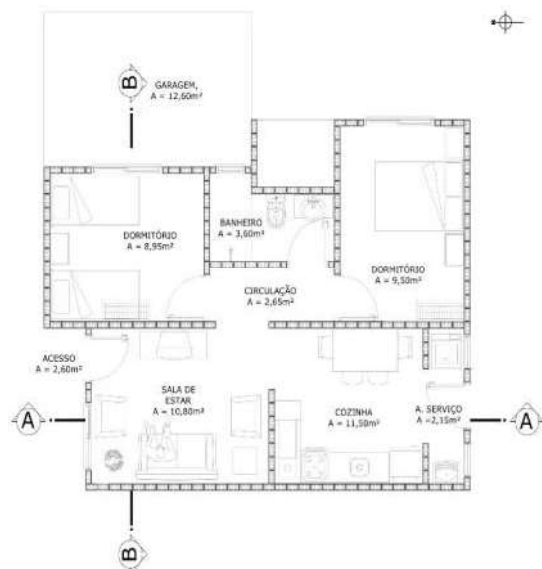


Figura 3. Planta baixa arquitetônica da Casa Popular Eficiente – Sem escala

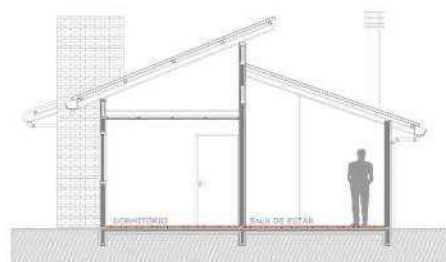


Figura 4. Corte BB da Casa Popular Eficiente – Sem escala

De acordo com o Memorial Descritivo do projeto, a fundação da edificação do tipo radier possui área de 103,125 m² e 10 cm de espessura, e construída acima de uma camada de nivelamento de 7cm de brita, com concreto usinado de resistência característica à compressão de 25 MPa. A armação da estrutura é composta por uma malha dupla de 15 cm x 15 cm com aço de ϕ 10 mm. A superestrutura foi executada em acordo com as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2013), utilizando o concreto usinado de iguais características à fundação, sendo preparado, lançado e adensado mecanicamente.

Tijolos ecológicos de solo-cimento (25 cm x 12,5 cm x 3,6 cm), um tipo de bloco de terra comprimida (BTC), compõe as paredes da edificação, sendo utilizados 64 unidades para cada metro quadrado de área. Os blocos, constituídos por 88% de saibro e 12% de cimento comprimidos em prensa hidráulica e curados com água, possuem resistência de 3 Mpa, e foram assentados com cola PVA à base de água devido à característica de encaixe.

No piso, utilizou-se PVC reciclado, de dimensões 15,24 cm x 91,44 cm x 0,5 cm, e o forro foi executado com Painéis de Tiras de Madeira Orientadas (OSB) de 2,5 m x 1,25 m x 0,01 m, um tipo de painel estrutural de madeira, de alta resistência mecânica e rigidez. A cobertura é composta por telhas onduladas Tetra Pak, possuindo em sua composição 75% plástico, 23% alumínio e 2% de fibras naturais. Em relação às esquadrias, utilizou-se madeira de *Eucalyptus grandis*.

Para que fosse possível analisar a redução das emissões de CO₂ da CPE devido à implementação de materiais alternativos/sustentáveis, foi necessário estimar também as emissões de dióxido de carbono de uma edificação de mesmo projeto arquitetônico. Nomeada no presente trabalho como residência padrão, o projeto dessa edificação genérica prevê a utilização de materiais usuais na construção de residências populares brasileiras.

Assim, os materiais utilizados no projeto da CPE, tijolo solo-cimento, telha ecológica Tetra Pak, forro de OSB, piso de PVC reciclável e esquadrias em *Eucalyptus grandis*, são respectivamente substituídos por tijolo de cerâmica vazado, telha de cerâmica, forro de PVC, piso de placas cerâmicas e esquadrias de alumínio. Os materiais constituintes da fundação e supraestrutura permanecem os mesmos.

Logo, os materiais escolhidos para a análise compreendem aqueles utilizados para a construção da fundação, dos fechamentos verticais, telhas, esquadrias e dos elementos de acabamento horizontais, como forro e piso.

4.2. Quantificação estimada das emissões de CO₂ das edificações apresentadas a partir do método QE-CO₂ de Costa (2012) em seu nível básico

Para a estimativa de emissões de CO₂ dos materiais da CPE, utilizando o Nível Básico do Método QE-CO₂, foi necessária uma coleta de dados em sites e catálogo de fabricantes, e as perdas em obra foram desconsideradas, utilizando-se assim o FP em obra calculado por Costa (2012). Devido à falta de dados referentes às telhas Tetra-Pak, a investigação a respeito das emissões pela energia gasta para produção e transporte das mesmas foi necessária.

Ademais, a quantificação dos materiais da CPE e residência padrão foi obtida através de medições e cálculos em projeto, levando em consideração a densidade e peso específico dos materiais, quando indisponível na Literatura. Os FPs não apresentados por Costa (2012) foram buscados na Literatura, em catálogos e sites de fabricantes, e quando não encontrados, foram considerados nulo, como o do material *Eucalyptus grandis*.

De acordo com Costa (2012), quando os dados disponíveis a nível nacional referentes ao consumo de energia, transporte e/ou composição química dos materiais são de valores médios, não específicos e detalhados, deve-se utilizar a equação 1. Já quando, além de se ter disponível somente valores limitados para os dados citados, não se tem informações consistentes acerca do tipo de transporte utilizado e distâncias percorridas entre os locais de extração, produção e consumo do material, deve-se utilizar a equação 2.

$$Emissões_{MT,j} = QT_j \times FP_j \times FEP_j \quad (2)$$

Onde:

- QT_j = quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas
- FP_j = fator de perda do produto j , adimensional;
- FEP_j = fator de emissão de CO₂ devido a utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto acabado.

Ainda, para calcular os dados referentes às telhas Tetra Pak, somaram-se os resultados das emissões de CO₂ geradas na fase de transporte e energia de produção, a partir de cálculos indicados pelo método de Costa (2012). Assim, a partir de dados do fabricante, cada tonelada de produto acabado das telhas Tetra Pak emite aproximadamente 0,033 toneladas de CO₂.

A quantificação dos materiais analisados e as emissões de CO₂ decorrentes da utilização dos materiais na Casa Popular Eficiente estão apresentados na Tabela 1. Já os resultados para a residência padrão encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 1. Quantificação das emissões de CO₂ dos materiais utilizados na CPE

CASA POPULAR EFICIENTE							
VOLUME	UN.	FP (%)	MATERIAL	FEP	UNIDADE	Emissões de CO ₂ sem FP (tCO ₂)	Emissões de CO ₂ com FP (tCO ₂)
32,236	t	17	Tijolos de solo-cimento	0,6518	tCO ₂ /t produto	2,521	2,95
0,511	t	8	Telha ecológica Tetra Pak	0,0434	tCO ₂ /t produto	0,022	0,024
0,539	m ³	15	Forro de OSB	0,3312	tCO ₂ /m ³	0,179	0,205
0,288	t	10	Piso de PVC reciclável	0,615	tCO ₂ /t produto	0,177	0,195

2,653	t	56	Cimento	0,6518	tCO ₂ /t produto	1,729	2,698
1,71	t	11	Aço	1,845	tCO ₂ /t produto	3,156	3,503
25,159	t	9	Agregados graúdos	0,086	tCO ₂ /t produto	2,164	2,358
8,52	t	7	Agregados miúdos	0,086	tCO ₂ /t produto	0,733	0,784
0,048	m ³	0	Esquadrias <i>Eucalyptus grandis</i>	0,4086	tCO ₂ /m ³	0,048	0,02
TOTAL (em tCO ₂)						10,7	12,737

Tabela 2. Quantificação das emissões de CO₂ dos materiais utilizados na residência padrão

RESIDÊNCIA PADRÃO							
VOLUME	UN.	FP (%)	MATERIAL	FEP	UNIDADE	Emissões de CO ₂ sem FP (tCO ₂)	Emissões de CO ₂ com FP (tCO ₂)
32,236	t	17	Tijolos de cerâmica vazados	0,111	tCO ₂ /t produto	3,578	4,187
0,511	t	8	Telha de cerâmica	0,111	tCO ₂ /t produto	0,057	0,062
0,539	m ³	15	Forro de PVC	0,615	tCO ₂ /m ³	0,331	0,348
0,288	t	10	Piso de placas cerâmicas	0,187	tCO ₂ /t produto	0,054	0,064
2,653	t	56	Cimento	0,6518	tCO ₂ /t produto	1,729	2,698
1,71	t	11	Aço	1,845	tCO ₂ /t produto	3,156	3,503
25,159	t	9	Agregados graúdos (brita 1)	0,086	tCO ₂ /t produto	2,164	2,358
8,52	t	7	Agregados miúdos (areia)	0,086	tCO ₂ /t produto	0,733	0,784
0,048	m ³	0	Esquadrias de Alumínio	4,441	tCO ₂ /m ³	0,214	0,214
TOTAL (em tCO ₂)						12,016	14,218

Os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 demonstram que o uso de tijolos de solo cimento mostrou-se mais eficaz quanto ao desprendimento de CO₂, impedindo que mais de uma tonelada de CO₂ fosse emitida para a atmosfera em comparação com o uso de tijolos cerâmicos vazados. Da mesma forma, a substituição das telhas em cerâmica por telhas Tetra Pak demonstrou ser bastante significativa quanto aos impactos gerados por essa análise, diminuindo em 35 kgCO₂/t as emissões entre elas.

O forro em OSB também resultou ser menos prejudicial ao ambiente em comparação ao forro de PVC. Enquanto aquele emitiu 0,178 tCO₂/m³, o de PVC emitiu aproximadamente o dobro, 0,331 tCO₂/m³. Em relação as esquadrias, as fabricadas em *Eucalyptus grandis* produziram 19,7 kgCO₂/m³ de emissões, enquanto que aquelas produzidas com alumínio somaram 214,4 kgCO₂/m³. Já os resultados para o piso demonstraram menores emissões para o de placas cerâmicas, utilizado na residência padrão e contabilizando 54 kgCO₂/t, em comparação com 177 kgCO₂/t do piso em PVC reciclado.

A respeito das emissões referentes à fundação e supraestrutura, considerando que ambas as residências possuem estruturas idênticas, o aço demonstrou ser o material que promove maiores emissões à atmosfera em relação aos agregados graúdos, cimento e agregados miúdos, contabilizando respectivamente 3,156 tCO₂/t, 2,164 tCO₂/t, 1,729 tCO₂/t e 0,733 CO₂/t. Entretanto, para a contabilização específica das emissões totais para uma tonelada de fundação acabada, por exemplo, é necessário calcular o quantitativo de materiais para a mesma.

Quando contabilizados os FPs de cada material, a diferença entre o total de emissões entre a CPE e a residência padrão é ainda maior, de 1,316 tCO₂ da diferenciação sem FP para

1,481 tCO₂. Esse fato demonstra o potencial de redução de emissões de GEE quando se atribui à uma construção o uso de materiais alternativos de menor impacto ambiental. Desse modo, as quantificações das emissões dos materiais analisados totalizaram 12,737 tCO₂ para a CPE, e 14,218 tCO₂ para a residência padrão, considerando-se os fatores de perda de cada material.

5. DISCUSSÕES

De acordo com os resultados apresentados, considerando-se o fator de perda de cada material, percebe-se que o uso de BTC de solo-cimento reduz em 29,5% as emissões de CO₂ quando comparado à quantificação com tijolos cerâmicos. Acredita-se que essa redução se deve, principalmente, à diferença entre os processos de fabricação dos mesmos, considerando que o BTC é produzido a partir da mistura de solo específico com uso do cimento para estabilização, sendo comprimido em prensa manual ou hidráulica, não utilizando o processo de queima como tijolo cerâmico.

Da mesma forma, o uso de telhas ecológicas Tetra Pak foi 61,3% menor em relação as telhas de cerâmica, considerando para a fabricação da primeira dois a três mil embalagens longa vida reaproveitadas (NUNES, 2012), sem a utilização em massa de matéria prima virgem e não necessitando do processo de queima utilizado na fabricação da segunda opção.

Em relação aos forros, o de OSB demonstrou um desprendimento de CO₂ 41,1% menor em relação ao forro de PVC. Essa redução explica-se pela composição em madeira do forro OSB diferente da dos materiais utilizados na fabricação do PVC (policloreto de vinila), sendo produzido com 57% de sal marinho e 43% de matéria prima proveniente do petróleo (PIVA; WEIBECK, 2004).

Uma das diferenciações mais significativas foi identificada nas esquadrias, mostrando a vantagem na utilização de esquadrias em madeira, revelando a quantificação estimada de CO₂ mesma, feita com *Eucalyptus grandis*, 90,65% menor que a produzida com alumínio. Entretanto, deve-se salientar que a comparação dos impactos ambientais foi realizada utilizando-se como critério somente o desprendimento de CO₂, desconsiderando qualquer influência de fatores como vida útil e manutenção dos materiais.

Ainda, o piso de PVC reciclável, utilizado na CPE apresentou 0,177 tCO₂ de emissões, enquanto que o piso de placas cerâmicas emitiu 0,054 tCO₂, resultando em um desprendimento de 204,7% a mais de CO₂. No entanto, é necessário considerar que o piso de PVC é produzido com 67% de material reciclado, reduzindo o uso de matérias primas virgens, devendo ser considerado como uma opção de material de menor impacto ambiental.

Considerando a infraestrutura de ambas as casas idênticas e projetadas com igual composição, o cimento, aço, agregados graúdos (brita um) e agregados miúdos (areia) possuem a mesma quantificação de emissões. Observa-se então, que a infraestrutura foi responsável por 72,7% das emissões totais da CPE e por 64,7% das emissões da residência padrão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados expressados pelo presente estudo revelam que a utilização de materiais denominados alternativos pelo mercado, que consideram a influência da produção nos impactos para o meio ambiente, é potencialmente eficaz para a redução de emissões de CO₂ dos materiais de construção para a atmosfera, um dos fatores mais influentes para a intensificação do processo de aquecimento global.

Considerando-se essa afirmação, a inserção no mercado de conceitos e práticas que visam a promoção e execução dos princípios da sustentabilidade ambiental é uma demanda internacional, e exige de todos os países o envolvimento e compromisso com ações de mitigação ou postergação dos impactos ambientais locais. Nesse sentido, a construção civil é vista como uma área em potencial para a redução das emissões dos GEE, através do desenvolvimento de tecnologias e práticas responsáveis, principalmente no que diz respeito aos processos produtivos dos materiais da construção.

Desse modo, o incentivo à produção de materiais mais duráveis que os disponíveis atualmente no mercado; que utilizem materiais de reciclagem incorporados à produção; com criteriosa avaliação das condições de extração de matéria prima e distâncias percorridas durante o processo são algumas ações a serem consideradas para que, ao final da fabricação, os produtos consigam, de fato, atuar como agentes colaboradores da atenuação dos impactos ambientais.

Ainda, para que haja a verdadeira incorporação desses materiais no mercado da construção civil, é fundamental a conscientização e validação das recorrentes preocupações ambientais por investidores e usuários. Assim, essa incorporação poderia se tornar um processo comum e natural, a partir de uma necessidade, e não mais alternativo, diferenciado e opcional, como ainda é considerado atualmente.

Para isso, a ação enfática do Estado é fundamental, atuando tanto na conscientização dos agentes do setor da construção e usuários, como na elaboração de iniciativas relacionadas ao processo produtivo dos materiais de construção. Dessa forma, podem ser vistas como opções de inserção compulsória nesses processos a avaliação do ciclo de vida (ACV) de um produto; quantificação de emissões de CO₂; a avaliação de gastos energéticos de um material; entre outros, estando de acordo com índices e recomendações estabelecidos por normativas e legislações a serem melhores desenvolvidas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agopyan, V.; John, V. M. (2011). *O desafio da sustentabilidade na construção civil. Série Sustentabilidade – V. 5. São Paulo: E. Blucher.*
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. (2013). *NBR 6118: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT.*
- Brasil. (2009). *Lei nº 12.187, de 29 de Dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm*
- Burke, B.; Keeler, M. (2010). *Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis. Porto Alegre: Bookman.*
- Costa, B. L. C. (2012). *Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil.*
- Dias, G. F. (2002). *Pegada ecológica e sustentabilidade humana. São Paulo: E. Gaia.*
- Dow, K.; Downing, T. E. (2007). *O atlas da mudança climática: o mapeamento completo do maior desafio do planeta. Tradução de Vera Caputo. São Paulo: Publifolha.*
- Du Plessis, C. (2002). *Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries. Pretoria: CSIR Building and Construction Technology.*
- Fujihara, M.A.; Lopes, F. G. (2009). *Sustentabilidade e mudanças climáticas: guia para o amanhã. São Paulo: Senac São Paulo.*
- Gan, V. J. L. et al. (2017). *Developing a CO₂-e accounting method for quantification and analysis of embodied carbon in high-rise buildings. Journal of Cleaner Production. [s. l.], v. 141, p. 825–436.*

- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. (1995). *Climate Change 1995: IPCC Second Assessment. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [S.l.: s.n.]. Disponível em <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Reino Unido e Nova York: Cambridge University Press. Disponível em [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf.
- Li, D. Z. et al. (2013). A methodology for estimating the life-cycle carbon efficiency of a residential building. *Building and Environment.* [s. l.], v. 59, p. 448–455.
- Li, L., Chen, K. (2017). Quantitative assessment of carbon dioxide emissions in construction projects: A case study in Shenzhen. *Journal of Cleaner Production.* [s. l.], v. 141, p. 394–408.
- Mattos, N. S.; Granato, S. F. (2010). *Terra em alerta.* 1ª ed. São Paulo: Saraiva.
- Nunes, M.B. (2012). *Impactos ambientais na indústria da cerâmica vermelha. Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro – REDETEC. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas- SBRT.* Disponível em <http://respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTcwNQ==>.
- Pereira, M. F. B. (2014). *Conteúdo Energético e Emissões de CO2 em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).* Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, Brasil.
- Piva, A. M.; Weibeck, H. (2004). *Reciclagem do Plástico – como fazer da reciclagem um negócio lucrativo.* São Paulo: Artiliber.
- Rasmussen et al. (2018). Analysing methodological choices in calculations of embodied energy and GHG emissions from buildings. *Energy and Buildings.* [s. l.], v. 158, p. 1487–1498.
- Rothschild, D. (2007). *Manual Live Earth de sobrevivência ao aquecimento global: 77 táticas essenciais para frear as mudanças climáticas ou sobrevive a ela.* Barueri: Manole.
- Vagheti, M. A. O.; Santos, J. C. P.; Carissimi, E. (2015). *Casa popular eficiente: uma proposta de moradia de baixo custo e sustentável.* In: *Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1, Guimarães. Euro-ELECS 2015: Anais...* Guimarães: Euro-ELECS. Disponível em http://civil.uminho.pt/euro-elecs-2015/files/Euro-ELECS_2015-Proceedings_Vol3.pdf.
- Vagheti, M.A.O. et al. (2013). *Casa Popular Eficiente: um benefício ambiental aliado a um custo mínimo. Projeto de Pesquisa (Protocolo GAP/CT nº 28582).* Santa Maria: UFSM.
- Valle, C. E. (2002). *Qualidade ambiental: ISO 14000.* São Paulo: Editora Senac São Paulo.

8. AGRADECIMIENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à UFSM e ULBRA-Santa Maria pelo apoio prestado e condições dadas para a realização da presente pesquisa.