

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

**GIOVANI PIETRO BALBINOTT PALUDO
HELENA AMORIM DE CASTRO GALLERA**

**PAREDES DE CONCRETO x WOOD FRAMING: UM ESTUDO
COMPARATIVO DA EMISSÃO DE CO₂ NA ETAPA DE PRÉ USO DO
CICLO DE VIDA ENERGÉTICO.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2021**

**GIOVANI PIETRO BALBINOTT PALUDO
HELENA AMORIM DE CASTRO GALLERA**

**PAREDES DE CONCRETO x WOOD FRAMING: UM ESTUDO
COMPARATIVO DA EMISSÃO DE CO₂ NA ETAPA DE PRÉ USO DO
CICLO DE VIDA ENERGÉTICO.**

**CONCRETE WALLS x WOOD FRAMING: A COMPARATIVE STUDY
OF THE CO₂ EMISSION FOR THE PRE-USAGE STAGE OF THE
ENERGY LIFE CYCLE.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Eloy Fassi Casagrande Junior

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GIOVANI PIETRO BALBINOTT PALUDO
HELENA AMORIM DE CASTRO GALLERA**

**PAREDES DE CONCRETO x WOOD FRAMING: UM ESTUDO
COMPARATIVO DA EMISSÃO DE CO₂ NA ETAPA DE PRÉ USO DO
CICLO DE VIDA ENERGÉTICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30 de Novembro de 2021

Eloy Fassi Casagrande Junior Brasil

Doutorado em Engenharia de Recursos Minerais e Meio Ambiente pela Universidade de
Nottingham, Grã-Bretanha(1996)

Adjunto 4 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná , Brasil

José Alberto Cerri Brasil

Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos,
Brasil (1999)

Professor Associado 4 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná , Brasil

Carlos Alberto da Costa

Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
(2003)

Professor Associado 4 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná , Brasil

**CURITIBA
2021**

RESUMO

O grupo de cientistas participantes do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC) vem estudando, desde 1988, a variação na temperatura média do planeta, suas causas e consequências. Modelos mostram que variações que excedam os $+1,5^{\circ}\text{C}$ (em comparação com dados de 1850) teriam efeitos severos no ambiente. Os dados da versão mais recente do relatório (AR6, de agosto de 2021) apontam que essa variação já está em $+1,09^{\circ}\text{C}$, e diversos estudos e eventos vêm comprovando as consequências modeladas. A base científica do AR6 também reforça que os efeitos da ação humana no planeta são responsáveis por virtualmente todo esse aquecimento, sendo o principal contribuinte o dióxido de carbono (CO_2). O presente trabalho conecta o momento global de urgência na redução de GEEs ao cenário nacional de construção, apresentando e fazendo um comparativo entre uma das tecnologias mais incentivadas para a construção de conjuntos habitacionais (Paredes de Concreto) e um sistema alternativo menos utilizado no Brasil (*Light Wood Framing*), a partir da análise de quantitativos de materiais nas principais etapas da obra. O resultado final são estimativas das variações na emissão de CO_2 de cada sistema na etapa de pré-uso do ciclo de vida, que mostram como pequenas mudanças no setor da construção podem trazer impactos significativos, especialmente quando considerados em larga escala.

Palavras-chave: Construção civil. Paredes de concreto. *Wood framing*. Emissão de CO_2 .

ABSTRACT

The group of scientists of the IPCC has been studying, since 1988, the variation in the global average temperature, its causes, and consequences. Modeling has shown that a variation exceeding +1,5°C (in comparison with temperatures from 1850) would imply severe environmental damage. Data from the most recent version of the IPCC Report (the AR6, from august 2021) shows this variation is already +1,09°C, and many studies and climatic events have been confirming the predictions. The scientific basis of AR6 also reinforces that the effects of humans are responsible for virtually all the observed warming, mostly led by the Carbon Dioxide (CO₂). This work connects the global moment of urgency in reducing greenhouse gases emissions to the Brazilian Civil Construction, introducing and comparing one of the most common technologies in housing estates (concrete walls) and a lesser-utilized alternative (wood framing), through analyses of the material quantities of each system. The final results are estimations of the greenhouse gas emissions in each system for the pre-usage steps of the life cycle of the building, showing the impacts made possible by alternative methods - especially on a bigger scale.

Keywords: *Civil construction. Sustainability. Concrete walls. Wood framing. CO₂ emissions.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - NDCs assumidos no Acordo de Paris	23
Tabela 2 - Principais GEEs e seu potencial de aquecimento global (GWP)	27
Tabela 3 - Emissão total de GEEs da Construtora Camargo Corrêa em 2015	27
Tabela 4 - Sumário de Impacto Ambiental para um conjunto residencial em Toronto - Athena Eco Calculator	29
Tabela 5 - Fatores de emissão de CO₂ para os principais materiais de uma obra, de acordo com o nível básico, na cidade do Rio de Janeiro	30
Tabela 6 - Fases e etapas do ciclo de vida energético das edificações residenciais	32
Tabela 7 - Etapas selecionadas para análise	34
Tabela 8 - Geração de CO₂ por fonte de energia	35
Tabela 9 - Geração de CO₂ durante o processo de fabricação, por material	36
Tabela 10 - Geração total de CO₂ por material	37
Tabela 11 - Comparação de emissões para Costa (2012) e Tavares (2006)	38
Tabela 12 - Fatores de reposição	45
Tabela 13 - Consumo de materiais por método, em toneladas	49
Tabela 14 - Emissão de CO₂ por método (t CO₂)	51
Tabela 15 - Emissões totais de CO₂, por método	54
Tabela 16 - Emissões totais de CO₂, em comparação com Tavares	54
Tabela 17 - Emissão total de CO₂ para cenários de unidades construídas	56

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 - Mudança na Temperatura Global	14
Gráfico 2 - Impactos e riscos associados com as razões para preocupação (RFCs)	15
Gráfico 3 - Avaliação síntese dos extremos quentes observados no mundo	16
Gráfico 4 - Avaliação síntese das fortes precipitações observadas no mundo	16
Gráfico 5 - Mudança na temperatura global da superfície entre 1850 e 2020	18
Gráfico 6 - Contribuições para as variações entre 1951 e 2010	18
Gráfico 7 - Aumento observado nas últimas décadas e contribuições	19
Gráfico 8 - Mudança na temperatura global da superfície nas últimas décadas (°C)	20
Gráfico 9 - Cenários ilustrativos de emissões anuais futuras de GEEs	21
Gráfico 10 - Composição da matriz energética brasileira e mundial (%)	26
Gráfico 11 - Participação nas emissões totais de Paredes de Concreto, por material	52
Gráfico 12 - Participação nas emissões totais de <i>Light Wood Framing</i> , por material	52
Gráfico 13 - Total de emissões por etapa de obra e método	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fôrmas de paredes de concreto	40
Figura 2 - Construção em paredes de concreto	40
Figura 3 - Estrutura do painel de <i>Light Wood Framing</i>	42
Figura 4 - Planta baixa do projeto do prédio construído em <i>Wood Framing</i>	47
Figura 5 - Planta baixa do projeto do prédio construído em paredes de concreto	48

LISTA DE SIGLAS

ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AVCE	Avaliação do Ciclo de Vida Energético
BEN	Balanco Energético Nacional
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CMMAD	Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
EE	Energia Embutida
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEEs	Gases de Efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OIE	Oferta Interna de Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PBQP-H	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat
PGRCC	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RTE	Requisitos Totais de Energia

LISTA DE ACRÔNIMOS

CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DATec	Documento de Avaliação Técnica
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
COP21	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivos.....	11
1.2	Justificativa.....	11
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	Sustentabilidade ambiental e o cenário atual.....	12
2.1.1	Relatório de mudanças climáticas.....	13
2.1.2	Variação na temperatura média global e seus impactos.....	13
2.1.3	Causas e como mitigar os impactos.....	17
2.1.4	Acordos internacionais e a situação do Brasil.....	21
2.2	Impactos do setor da construção.....	24
2.3.	Métodos de quantificação dos impactos.....	25
2.3.1	GHG Protocol.....	26
2.3.2	Athena EcoCalculator.....	28
2.3.3	Método QE-CO ₂	29
2.3.4	Emissão de CO ₂ por Análise do Ciclo de Vida Energético.....	31
2.3.5	Escolha do Método de Quantificação dos Impactos.....	33
2.4.	Métodos construtivos escolhidos.....	39
2.4.1	Método construtivo de paredes de concreto.....	39
2.4.2	Representatividade do método no Brasil.....	40
2.4.3	Método construtivo Wood Framing.....	41
2.4.4	Representatividade do método no Brasil.....	43
3.	METODOLOGIA.....	44
3.1	Método de cálculo.....	44
3.2	Processo de cálculo.....	46
3.3	Objeto de estudo.....	47
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Aplicação da metodologia.....	49
4.2	Análise dos resultados.....	52
4.3	Discussão dos resultados.....	54
4.3.1	O déficit habitacional brasileiro e impactos em escala.....	55
5.	CONCLUSÃO.....	57
5.1.	Revisão dos resultados.....	57
5.2.	Próximos passos.....	59

REFERÊNCIAS.....	60
ANEXO 1 - Quantitativo de materiais - Paredes de Concreto.....	64
ANEXO 2 - Quantitativo de materiais - <i>Light Wood Framing</i>.....	65
APÊNDICE 1 - Quantitativos levantados.....	66
APÊNDICE 2 - Quantitativos levantados + reposição.....	67
APÊNDICE 3 - Quantitativos em toneladas.....	68
APÊNDICE 4 - Energia embutida.....	69
APÊNDICE 5 - Emissão de CO₂.....	70
APÊNDICE 6 - Fatores de Multiplicação.....	71
APÊNDICE 7 - Fatores de Emissão.....	72

1. INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), é o órgão responsável por rastrear e avaliar as mudanças na temperatura global, suas causas e impactos. Os dados mais recentes, do AR6, apontam que a variação nessa temperatura já atingiu $+1,09^{\circ}\text{C}$, e tem tendência de alta para os próximos anos. As variações observadas têm impulsionado movimentos e acordos internacionais em direção à redução das emissões de CO_2 , entre eles o objetivo de zerar essas emissões até 2050 (o *Race to Zero*, ou “corrida ao zero”), e as metas de contribuições nacionais (NDCs, na sigla em inglês). Apesar das metas serem um bom começo, torná-las realizáveis exige sua tradução em planos e ações.

Em paralelo, o setor da construção civil, um dos motores da economia brasileira - responsável por 10% das vagas de emprego no ano de 2020 (CAGED, 2021), e quase 3% do PIB total do país no mesmo período (CBIC, 2021) também tem grande responsabilidade na emissão de resíduos sólidos e do dióxido de carbono do planeta: em 2018, foram 1,4 bilhões de toneladas de CO_2 , e 2,2 bilhões de toneladas de carbono equivalente (CO_2eq), segundo o SEEG (2019). O valor corresponde a 4,5% das emissões globais no mesmo ano (WRI, 2021).

Nesse contexto, o presente trabalho compreende uma análise das emissões de CO_2 na etapa pré-operacional de dois métodos construtivos, Paredes de Concreto e *Wood Framing*. A sequência tem início na apresentação do atual cenário ecológico do planeta. Em seguida, é apresentada a participação da Construção Civil nesse cenário e algumas planilhas e metodologias criadas para calcular o impacto de construções, além da seleção da mais apropriada. Após essa introdução, serão apresentados os métodos construtivos supracitados e sua situação atual no Brasil e no mundo, e então os projetos que servirão de base para o levantamento quantitativo e posterior análise de emissão de CO_2 . Os últimos capítulos trarão os resultados encontrados e as conclusões sobre as análises.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é estabelecer um comparativo entre os modelos construtivos de paredes de concreto e *Wood Framing* quanto à emissão de CO₂ na etapa de pré uso dos seus ciclos de vida energéticos utilizando a metodologia estabelecida.

Os objetivos específicos são: apresentar a situação global atual e a conexão desta com o dióxido de carbono; apresentar o cenário atual dos efeitos antrópicos no planeta e no clima global; mostrar a relação do setor da construção civil com esse cenário; descrever os métodos construtivos analisados; apresentar metodologias de cálculo do impacto ambiental para a indústria da construção e escolher a mais apropriada; apresentar os projetos residenciais que serão utilizados como objeto de estudo; analisar e comparar os projetos apresentados, utilizando a metodologia estabelecida.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os conceitos de sustentabilidade e “pegada ecológica” não são novos - já há muito tempo se fala sobre a importância de não comprometer o futuro das gerações pelo mal uso dos recursos naturais. Apesar disso, os eventos climáticos extremos causados pelo aumento na temperatura média global (ou “aquecimento global”) vêm chamando a atenção de líderes globais para o assunto, e exigindo posturas mais severas e compromissos mais ousados.

Devido à relevância da indústria da construção nesse contexto, é importante entender como reduzir esses impactos e atender de uma forma mais sustentável a necessidade por moradias. O presente trabalho verifica possíveis diferenças no impacto ambiental de dois métodos bastante utilizados na construção de moradias populares e programas habitacionais, e visa aumentar o acervo do conhecimento de tomadores de decisão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E O CENÁRIO ATUAL

A primeira conferência da ONU sobre o meio ambiente foi realizada em 1972, em Estocolmo, na Suécia. Apesar disso, o momento que marca o início do debate sobre sustentabilidade é a apresentação do Relatório Brundtland, ou Relatório Nosso Futuro Comum, pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD). O Relatório, apresentado em 1987, define desenvolvimento sustentável como “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades”. No mesmo ano, como uma das consequências da Comissão, foi criado o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

Um ano depois, em 1988, foi realizada a Primeira Conferência Mundial sobre o Clima, na cidade de Toronto, Canadá, com o objetivo de alertar o mundo sobre o aquecimento do planeta. Ainda nesse ano, a ONU criou também o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), que tem como objetivo avaliar as mudanças climáticas causadas pela atividade humana, seus potenciais impactos ambientais e socioeconômicos, e buscar opções disponíveis de mitigação e adaptação.

Atualmente, o IPCC é composto por 4 grupos de trabalho, com foco em (1) embasamento na ciência física, (2) impactos, adaptação e vulnerabilidade, (3) mitigação das mudanças climáticas e (4) força-tarefa nos inventários nacionais de gases de efeito estufa, e seu principal produto é um relatório contendo a síntese do conhecimento científico a respeito das mudanças climáticas, com embasamento físico e científico dessas mudanças, vulnerabilidade dos sistemas socioeconômicos e naturais a elas, e maneiras de mitigá-las.

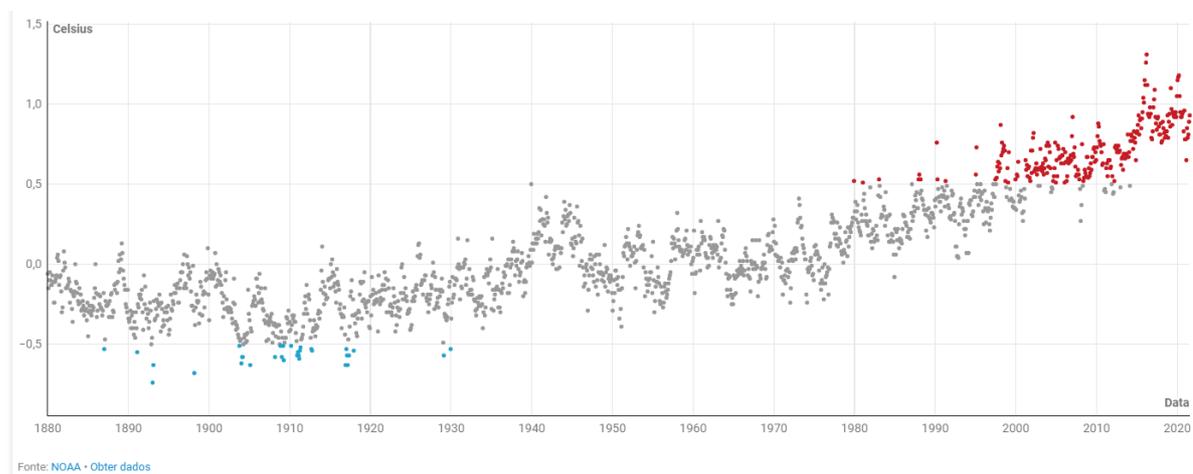
2.1.1 Relatório de mudanças climáticas

Já em 1990, o IPCC publicou um primeiro relatório que apontava a “certeza de que existe um efeito estufa que já mantém o planeta mais quente do que seria de outra forma” e que “emissões de atividades humanas estão aumentando substancialmente as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (...) resultado em um aumento na média da temperatura do planeta”. Além disso, o relatório aponta a “confiança que alguns gases são potencialmente mais efetivos que outros na mudança do clima” e que “o dióxido de carbono é responsável por mais de metade dos efeitos estufa no passado e deve continuar a ser no futuro”. Finalmente, são sugeridas estratégias de resposta à situação, implantando programas de desenvolvimento sustentável, e programas de cooperação internacional para atingir os objetivos.

Atualmente, muitos desses acordos já aconteceram (o mais recente, Acordo de Paris, foi assinado em 2015) e tanto os métodos de análise e previsão de impactos evoluíram em precisão, quanto o grupo de estudos que compõe o relatório cresceu - atualmente, o relatório é feito por uma rede descentralizada e remota de cientistas voluntários, comandada pela hierarquia do IPCC, e depois passa por um processo de revisão em várias etapas, primeiro por milhares de especialistas em áreas específicas de conhecimento, e depois por especialistas e representantes governamentais. Em 09 de agosto de 2021, foi lançada a base física e científica da sexta edição, que traz alguns dados alarmantes.

2.1.2 Variação na temperatura média global e seus impactos

O ponto de partida do relatório é a análise do aumento na temperatura média global, tomando como referência a temperatura na década de 1850. Essa temperatura média é impactada pelo quanto de luz solar o planeta absorve e quanto irradia para o espaço como calor, e também é conhecida como “aquecimento global”. Uma maior temperatura corresponde a uma relação menor entre absorção e irradiação, e tem como efeito um aumento na intensidade das mudanças climáticas.

Gráfico 1 - Mudança na Temperatura Global

Fonte: Um Só Planeta (2021)

O gráfico acima foi elaborado a partir de dados da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (NOAA), e mostra a evolução da temperatura média global em relação à média registrada no século XX. O gráfico traz, além da grande variação já registrada (estima-se $+1,09^{\circ}\text{C}$), uma tendência de alta para os próximos anos.

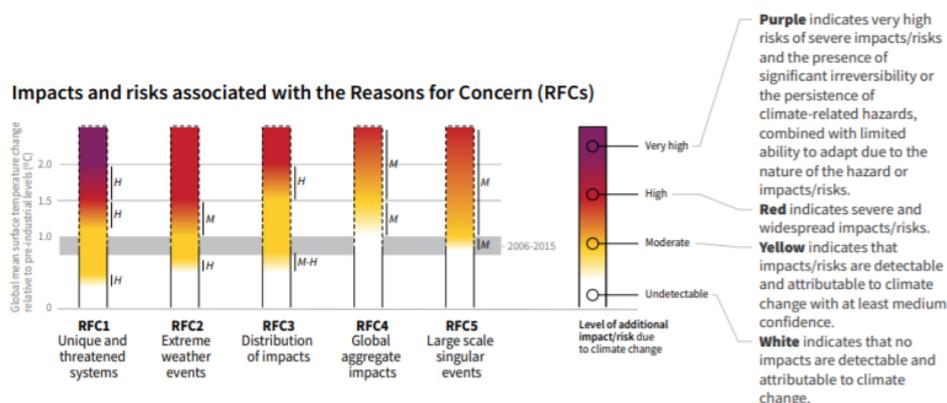
Como resultado dessa variação na temperatura, vários sistemas (naturais e humanos) vêm sendo impactados. De acordo com os estudos realizados pelo IPCC, existem evidências científicas de impacto em todos os continentes, em sistemas físicos (derretimentos, enchentes, secas e erosões), biológicos (como incêndios florestais) e humanos (prejuízos na produção de comida, saúde e sobrevivência, além de outros impactos econômicos).

Em 2018, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas publicou o *Special Report: Global Warming of $1,5^{\circ}\text{C}$* (SR15), uma versão especial de relatório com foco nas consequências de um aquecimento global acima de $1,5^{\circ}\text{C}$, e possíveis caminhos para reduzir esses impactos.

Uma das conclusões das pesquisas realizadas foi que os efeitos do aquecimento já provocado vão continuar afetando futuras gerações por séculos e talvez até milênios, mas não devem por si próprios causar mais aquecimento - ou

seja, a situação atual já não é reversível, mas é possível impedir que ela se agrave. Outra conclusão foi sobre os riscos ligados ao clima, que foram chamados de “Razões para Preocupação” (RFCs, na sigla em inglês), como mostra a figura abaixo.

Gráfico 2 - Impactos e riscos associados com as razões para preocupação (RFCs)



Fonte: Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C do IPCC (2018)

A figura mostra cinco RFCs, que dizem respeito a (1) sistemas únicos e ameaçados, (2) eventos climáticos extremos, (3) distribuição dos impactos, (4) impactos globais agregados e (5) eventos singulares de larga escala, e o grau de riscos e impactos em cada uma dessas Razões em uma escala de cores. Em cinza está o aquecimento já estimado em 2015.

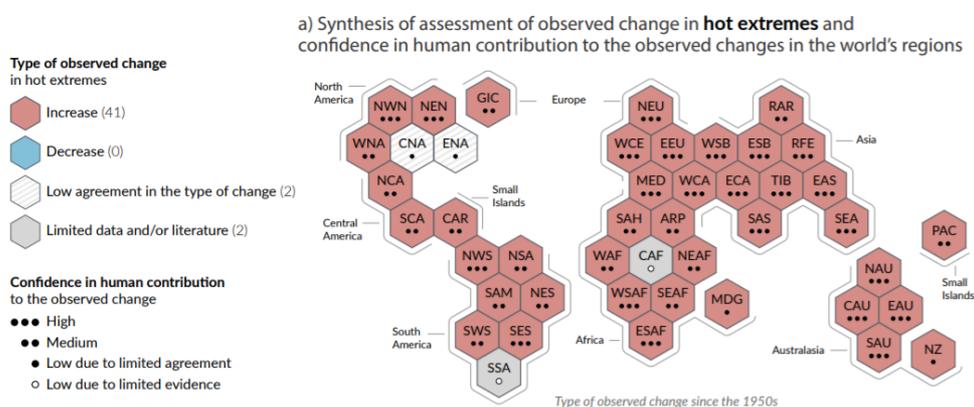
Uma primeira inferência que o gráfico permite é que um aquecimento até 1,5°C tem efeitos nocivos ao ambiente, mas ainda pouco severos perto do potencial previsto caso esse aquecimento ultrapasse o alvo. É também possível unir às previsões apresentadas os efeitos que já vêm sendo percebidos.

Já a base científica para o sexto relatório oficial do IPCC (AR6) publicado em agosto de 2021, aponta que o aquecimento atual já está em +1,09°C (quase 30% maior do que a variação de +0,85°C registrada em 2012, segundo a edição anterior do relatório, AR5).

Um exemplo bastante claro dos impactos é a extinção de ecossistemas inteiros (RFC 1). Uma pesquisa da British Columbia University mostrou que a atual

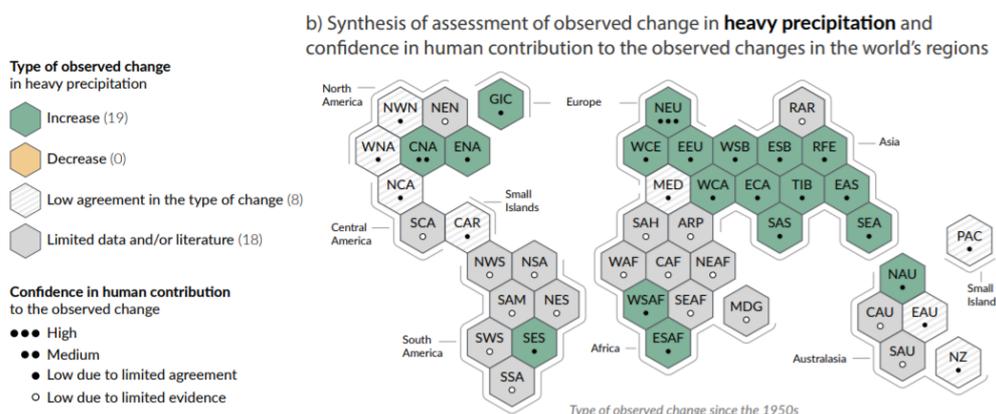
área ocupada por recifes de corais ao redor do mundo é menos da metade da observada na década de 1950. Além de prejudicar os corais, essa redução impacta diretamente as demais espécies que dependem do ecossistema - de peixes e crustáceos a tribos e sociedades litorâneas. Outro exemplo, mais palpável, são os eventos climáticos extremos (RFC 2). O relatório mais recente traz um mapa mostrando como já foram observados esses eventos em praticamente todas as regiões do planeta, tanto com calores extremos quanto com precipitações bem acima do esperado para a época do ano.

Gráfico 3 - Avaliação síntese dos extremos quentes observados no mundo



Fonte: Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C do IPCC (2018)

Gráfico 4 - Avaliação síntese das fortes precipitações observadas no mundo



Fonte: Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C do IPCC (2018)

As figuras mostram, além das áreas afetadas (hexágonos correspondem a cada região, CNA é Center North America, ou a região central da América do Norte, por exemplo), o tipo de observação (aumento ou redução) e a confiança na contribuição humana para esses eventos.

Além de perceber como praticamente todas as regiões do globo já foram afetadas por aumentos extremos na temperatura, é possível conectar o infográfico com eventos recentes. Só em julho de 2021 (poucas semanas antes da publicação do relatório), por exemplo:

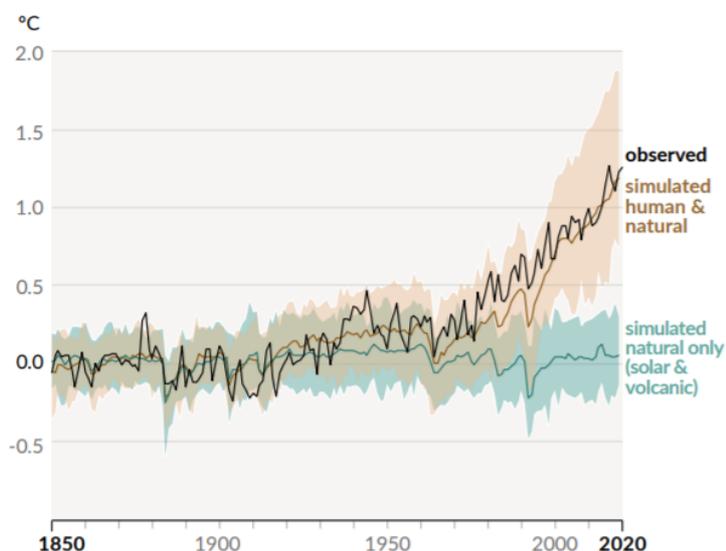
- Inundações na Alemanha e Bélgica destruíram completamente edifícios e carros e causaram mais de mil desaparecidos;
- Enchentes causaram centenas de mortes na China;
- Altas temperaturas no noroeste dos Estados Unidos e no Canadá chegaram a matar habitantes em algumas regiões, além de provocar diversos incêndios florestais.

Cada vez mais, os impactos climáticos estão deixando de ser previsões para se tornarem eventos reais.

2.1.3 Causas e como mitigar os impactos

O AR6 também afirma ser “incontestável que a influência humana tenha aquecido a atmosfera, oceano e continentes”, e que “mudanças rápidas e generalizadas na atmosfera, oceanos, criosfera e biosfera já ocorreram” (AR6, IPCC). A mesma publicação traz que, dos +1,09°C observados, apenas +0,2°C (menos de 2%) podem ser atribuídos a causas naturais, tendo todo o restante sido causado por ações antrópicas.

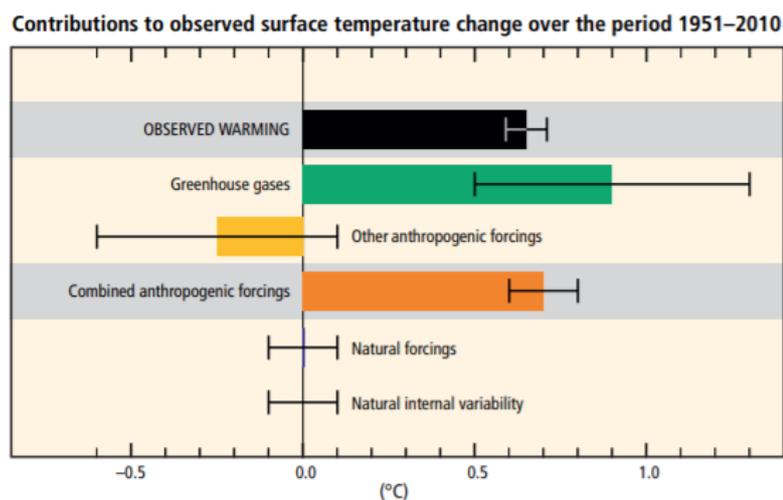
Gráfico 5 - Mudança na temperatura global da superfície entre 1850 e 2020



Fonte: Sexto relatório de avaliação do IPCC (2021)

A figura mostra a variação observada (em preto), contra a variação atribuída a causas naturais (em verde) e a atribuída à soma entre ações humanas e naturais (em marrom) - ou seja, praticamente toda a mudança observada é efeito antrópico. Já na versão anterior do relatório (AR5) é possível ver como o aquecimento do planeta está intimamente ligado às atividades humanas.

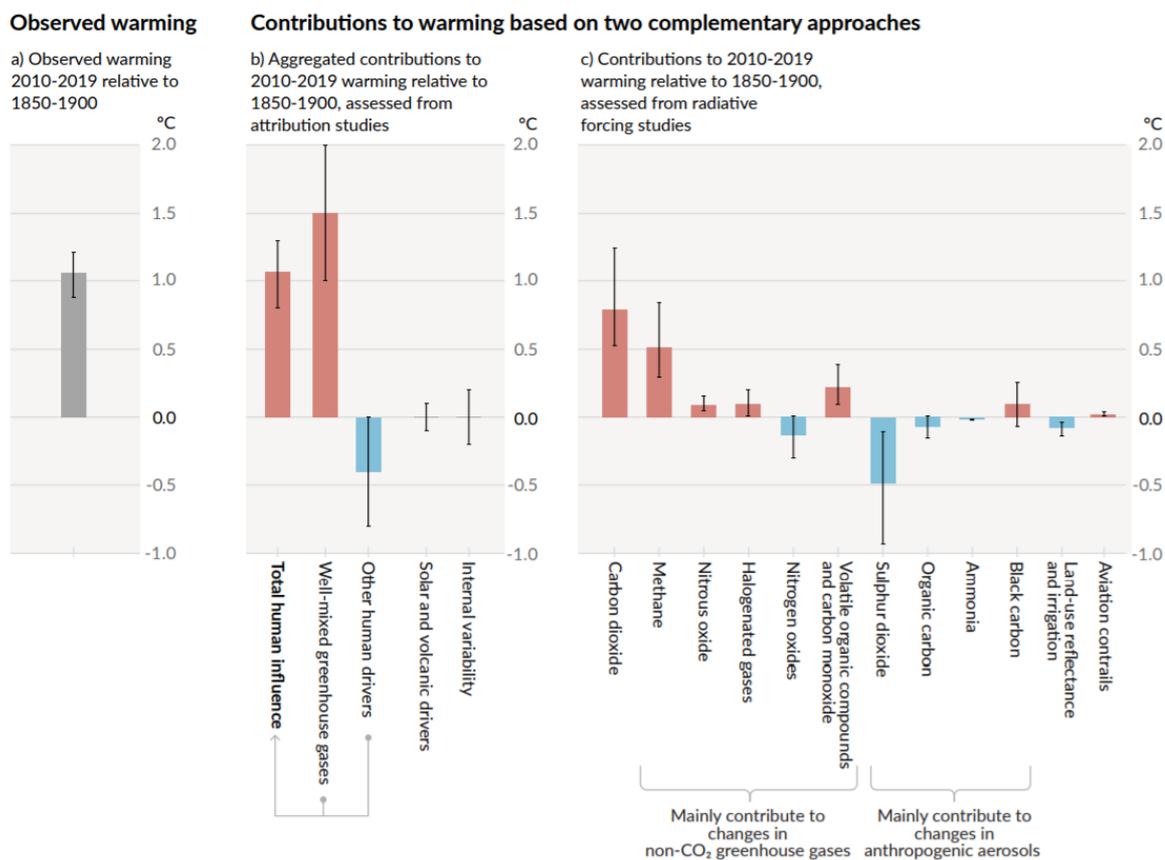
Gráfico 6 - Contribuições para as variações entre 1951 e 2010



Fonte: Quinto relatório de avaliação do IPCC (2015)

O gráfico do AR5 indica os contribuintes à variação média de temperatura. Nele, cada cor de barra representa um contribuinte, e os erros indicam como os efeitos observados podem variar positiva ou negativamente. A barra laranja indica a combinação dos efeitos humanos, e as barras abaixo dela os possíveis efeitos naturais. A versão atualizada do relatório, AR6, vai além e aponta o efeito de cada um dos principais gases emitidos pela atividade humana.

Gráfico 7 - Aquecimento observado nas últimas décadas e contribuições



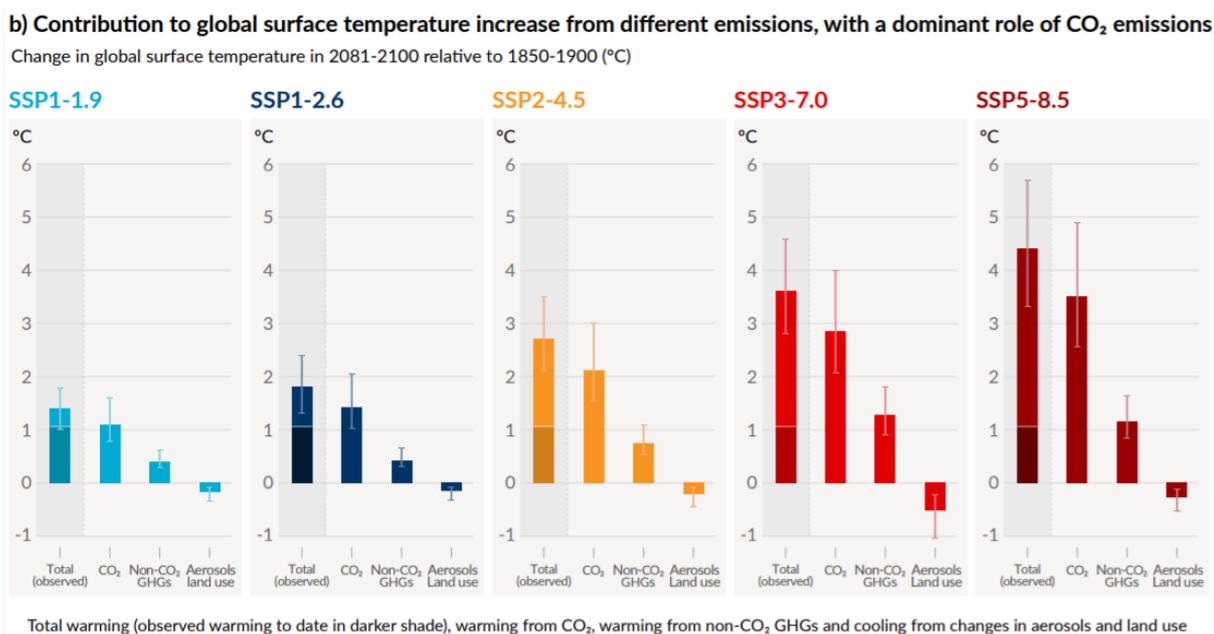
Fonte: Sexto relatório de avaliação do IPCC (2021)

Observando as ilustrações, fica claro o grande impacto das ações humanas no equilíbrio ambiental - a barra que indica a combinação dos efeitos humanos,

afetada principalmente pela emissão de GEES, corresponde a praticamente todo o aquecimento observado, tanto na versão do AR5 quanto na mais recente. Indo mais além e observando as parcelas relativas a cada gás, é possível observar que cerca de 70% da contribuição humana é atribuída ao CO₂.

Com o aquecimento atmosférico já observado de 1,0°C, não comprometer a qualidade de vida de gerações futuras requer ações imediatas. O AR6 apresenta cinco cenários de aquecimento global para o ano de 2100, de acordo com a redução na emissão dos principais gases.

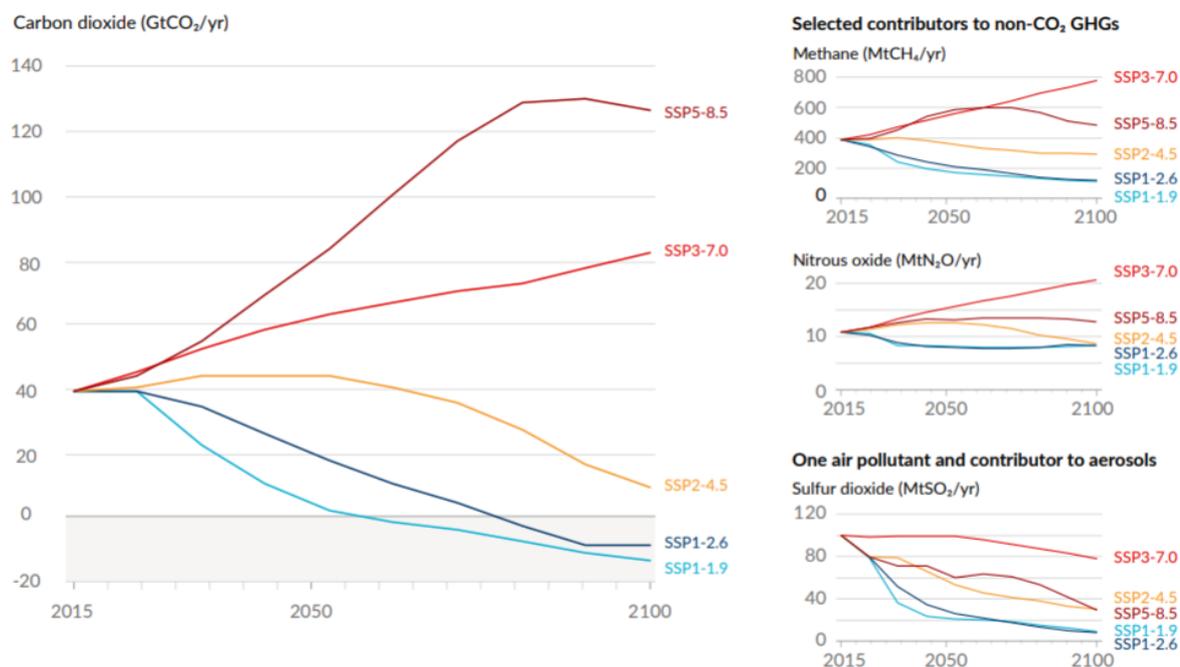
Gráfico 8 - Mudança na temperatura global da superfície nas últimas décadas (°C)



Fonte: Sexto relatório de avaliação do IPCC (2021)

A parcela mais escura da variação na temperatura representa o que já foi atingido e, portanto, é considerado praticamente irreversível. A parcela mais clara representa a provável variação nos próximos anos para cada cenário. Em todos os casos, é possível ver como o CO₂ é o principal responsável por essa variação e, portanto, que qualquer iniciativa em frear o aquecimento global e suas consequências obrigatoriamente passa por uma redução na emissão desse gás.

Gráfico 9 - Cenários ilustrativos de emissões anuais futuras de GEEs

a) Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenarios

Fonte: Sexto relatório de avaliação do IPCC (2021)

Os cenários onde o aquecimento global se mantém em níveis aceitáveis, com consequências esperadas (RFCs) razoáveis para a garantia da sobrevivência humana, exigem ações de não apenas reduzir ou zerar as emissões de CO₂, mas de começar a retirar o gás da atmosfera.

No melhor cenário (SSP1-1.9), seria necessário passar de uma emissão de 40 gigatoneladas de dióxido de carbono ao ano para uma emissão praticamente nula nos próximos 30 anos, alcançando uma emissão negativa (subtração de CO₂ da atmosfera) de quase 20 gigatoneladas por ano até o final do século.

2.1.4 Acordos internacionais e a situação do Brasil

Para evoluir em direção a essa redução na emissão e futura subtração de CO₂, é necessário não apenas o comprometimento individual dos que tenham o conhecimento e bom-senso à disposição, mas também políticas governamentais que estimulem a adoção de práticas mais sustentáveis. Para aumentar a

responsabilidade de cada governo sobre sua respectiva população, são importantes tratados e acordos internacionais que tragam, além de metas, planos de ação para atingir essa redução.

O mais recente desses acordos é o documento final gerado na Vigésima Primeira Conferência das Partes (COP-21), realizada na França, em 2015. O documento, que ficou conhecido como Acordo de Paris, começa “reconhecendo que as mudanças climáticas representam uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para as sociedades humanas e para o planeta”, a necessidade de “acelerar a redução das emissões globais de gases de efeito estufa” e “ênfatizando a necessidade de urgência no combate às mudanças climáticas”.

No Acordo estão previstas, entre outras resoluções, as contribuições nacionalmente determinadas pretendidas (iNDCs, na sigla em inglês) - metas voluntárias estabelecidas por cada país para suas emissões de GEEs. É importante destacar o impacto dos 10 principais poluentes (em ordem: China, Estados Unidos, União Europeia, Índia, Rússia, Japão, Brasil, Indonésia, Irã e Coréia do Sul) para o total de emissões globais, e a importância especial de que esses países se comprometam com (e cumpram) metas audaciosas de redução nas emissões.

O total de emissões atual (descontando emissões por uso da terra e florestas) está estimado em cerca de 46 Gt CO₂ e (gigatoneladas de CO₂ equivalente, medida utilizada como parâmetro para as emissões de vários GEEs com base no potencial de aquecimento global de cada um). O valor é 15% maior que o medido em 2015, e está mais em linha com os cenários negativos do que com os que conseguem frear as consequências do aquecimento. Se contarmos as emissões totais, o valor em 2016 era de aproximadamente 49,4 gigatoneladas.

A partir da promulgação do Acordo de Paris em cada uma das partes participantes, essas metas deixam de ser pretendidas e passam a ser Contribuições Determinadas (NDCs), compromissos de cada país com os demais. Todas as 192 partes da COP-21 já submeteram NDCs. Entre elas, vale destacar os compromissos adotados pela China, Estados Unidos e União Europeia (os principais poluentes,

nesta ordem), além dos Brasileiros (em 7º lugar no ranking de emissões do gás), como mostra a tabela abaixo.

Tabela 1 - NDCs assumidos no Acordo de Paris

Parte	Parcela atual da parte nas emissões globais de CO₂*	NDC para redução nas emissões de CO₂**
China	25,80%	65%
Estados Unidos	12,80%	52%
União Europeia	7,80%	55%
Brasil	2,30%	43%

* Dados de 2015

**Até 2030, em relação ao observado em 2005

Fonte: Adaptado de Climate Action Tracker e WRI Brasil (2021)

Caso os três primeiros países cumpram as metas estabelecidas, o total de emissões já atingiria cerca de 37 Gt CO₂e até 2030, uma redução de 18,7%. Já o Brasil pode impactar em pelo menos 1,0% as emissões descontando emissões por uso de terra e florestas. Em paralelo, a meta de zerar o desmatamento ilegal no período traria ainda mais contribuições ambientais.

Em 2018, a emissão anual do Brasil foi de 1,42 Gt CO₂e. Desse total, 33% (0,47 gigatoneladas) correspondem às emissões por geração de energia e processos industriais, 62% (0,88 gigatoneladas) são causadas por agricultura e outras mudanças no uso de terras e florestas, e menos de 5% (0,07 gigatoneladas) correspondem às emissões por resíduos. Globalmente, a participação por cada um desses grupos é de 79%, 18% e 3%, respectivamente. Essa diferença se deve, principalmente, ao perfil da matriz energética brasileira - de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), 48% da oferta interna de energia é composta por energias renováveis, que têm menor emissão de GEEs. Como parâmetro, a parcela mundial de energias renováveis correspondia a pouco mais de 26% em 2018, e deve atingir os 45% até o ano de 2040, de acordo com o C2ES.

Apesar de estar à frente de outras partes da COP-21 no tocante à emissão de poluentes por produção energética, o Brasil ainda tem muito a avançar em direção a sua meta de redução e, o que é mais preocupante, ainda não tem planos definidos para guiar esse avanço.

2.2 IMPACTOS DO SETOR DA CONSTRUÇÃO

De acordo com a Agência Internacional de Energia, só em 2019 foram emitidas 3,5 Gt de CO₂ na cadeia de vida de materiais de construção ao redor do globo, sendo a maior parte pela utilização de cimento e aço - o consumo global de cada material pelo setor foi de 2 Gt e 0,5 Gt, respectivamente. Olhando para os insumos da indústria, segundo Stachera (2008), os materiais cuja extração e produção mais emitem gases causadores do efeito estufa são: cimento, cal, aço (ferro), areia, brita e cerâmica vermelha. Portanto, é possível perceber que a escolha do método construtivo e seus insumos tem grande parcela no impacto ambiental total da edificação. Ainda assim, os métodos construtivos mais utilizados no Brasil têm como principais insumos os materiais listados como maiores poluentes.

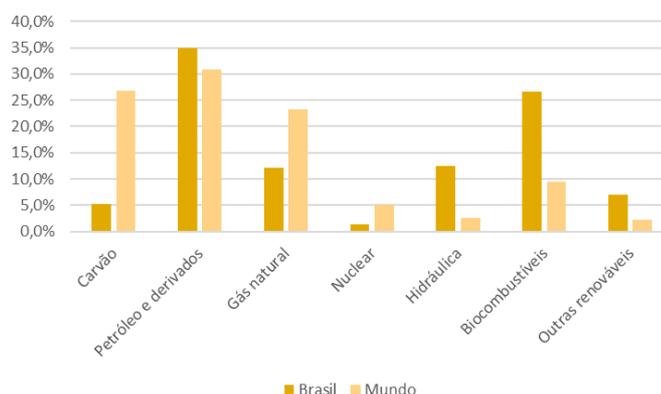
Fica óbvio que, para atingir as metas de redução de emissões (NDCs) com as quais o país se comprometeu, é importante atuar no setor da construção, buscando alternativas que reduzam a emissão ao longo das etapas da cadeia produtiva. A IEA estima que a neutralidade de emissões no setor exigirá uma redução de 50% nas emissões diretas (etapa de utilização e habitação), e de 60% nas emissões indiretas (nas demais etapas da vida da edificação, desde a extração de insumos até a finalização da construção). Inger Andersen, Diretora Executiva do PNUMA, traz a importância de uma “estratégia tripla” que inclua:

1. Redução agressiva na demanda de energia no ambiente construído;
2. Descarbonização do setor energético;
3. Estratégias de materiais que reduzam as emissões de CO₂ do ciclo de vida.

O Climate Action Tracker (análise científica independente, realizada desde 2009 por organizações de pesquisa que rastreiam ações climáticas) mostrou que é possível atingir o net zero (emissões nulas de carbono) no setor até o ano de 2050 apenas com as tecnologias existentes. Apesar disso, atingir esse nível exige investimentos substanciais em melhorias das fontes de aquecimento e resfriamento, e melhorias nas condições de isolamento térmico das casas. Já o relatório da IEA cita, entre as recomendações de roadmap para uma construção mais sustentável, a importância de “encorajar a compra de produtos com baixo consumo de energia e baixa emissão de GEEs, implementando políticas que promovam decisões de compra melhor embasadas na energia e carbono incorporados”.

2.3. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS

Com o intuito de quantificar os impactos e rastrear as ações climáticas tomadas nas diferentes indústrias, foram criadas diversas ferramentas de cálculo de emissão de GEEs. A principal semelhança entre elas é buscar um meio de transformar as atividades e insumos utilizados na produção de um material ou produto final em consumo de energia e emissão equivalente de gases; sua principal diferença é que cada uma tem sua própria abordagem da cadeia de produção e etapas a serem incluídas ou excluídas da geração, e muitas estão atreladas a uma localidade específica, pela maior ou menor utilização de um insumo energético na produção de um material, por exemplo - e, como já citado no item 2.1.4, as matrizes energéticas de cada país apresentam variações, sendo a brasileira bastante diferente do resto do planeta.

Gráfico 10 - Composição da matriz energética brasileira e mundial (%)

Fonte: Adaptado do IEA e BEN (2020).

Além da diferença no volume de produção (o Brasil produziu apenas 2,0% dos 606 exajoules globais), é clara a diferença na composição dos recursos utilizados - a energia utilizada no Brasil é bastante limpa em comparação com a média global, com uma participação muito maior da energia hidráulica e biocombustíveis, e menor de gás natural e carvão mineral. Mais de 45% da energia produzida no Brasil vem de fontes renováveis, contra menos de 15% no mundo. Como consequência dessa diferença na composição, cada Joule de energia consumido no Brasil tem um efeito menor na emissão de GEEs do que na maioria dos demais países e, por isso, métodos que desconsideram essas diferenças locais acabam sendo pouco eficientes na mensuração dos impactos.

2.3.1 GHG Protocol

O World Resources Institute (WRI) define o GHG Protocol como “um pacote de padrões, orientações, ferramentas e treinamentos para que empresas e governos mensurem e gerenciem as emissões antropogênicas responsáveis pelo aquecimento global”. Mais especificamente, o Protocolo traz padrões de contabilização de emissões/remoções de GEEs, adaptados para diferentes países para atender suas realidades. No Brasil, o Programa Brasileiro GHG Protocol é uma adaptação do método ao contexto brasileiro, e tem como fruto ferramentas de cálculo para a estimativa de emissões de gases do efeito estufa.

Além de diretrizes para cálculo e registros públicos de emissões, o programa traz uma ferramenta para a mensuração das emissões de acordo com o volume de cada GEE emitido ao longo da cadeia de produção. O principal trunfo do método é transformar t GEE (toneladas de gases do efeito estufa) em emissões de CO₂, gás tomado como referência. Abaixo são apresentados alguns dos principais GEEs e seu potencial de aquecimento global (GWP - global warming potential).

Tabela 2 - Principais GEEs e seu potencial de aquecimento global (GWP)

Gás	Família/Tipo	GWP
Dióxido de carbono (CO ₂)	-	1
Metano (CH ₄)	-	25
Óxido nitroso (N ₂ O)	-	298
HFC-23	HFC	14.800
HFC-143a	HFC	4.470

Fonte: Ferramenta GHG Protocol (2021)

O resultado final da ferramenta são quatro tabelas, a primeira com um resumo do total de emissões de cada gás em três escopos (1, 2 e 3), e as demais com as emissões por atividades geradoras, já transformadas em tCO₂e (toneladas de CO₂ equivalente). Na tabela abaixo é possível ver um exemplo de planilha preenchida, mostrando as emissões totais de 2015, pela Construtora Camargo Corrêa.

Tabela 3 - Emissão total de GEEs da Construtora Camargo Corrêa em 2015

GEE	Em toneladas métricas de CO ₂ equivalente (t CO ₂ e)		
	Escopo 1	Escopo 2 - Abordagem localização	Escopo 3
CO ₂	83.522,930	20.459,160	977.144,720
CH ₄	78,750	-	12,500
N ₂ O	1.847,600	-	-
HFC	-	-	-
NF ₃	-	-	-
Total	85.449,280	20.459,160	977.157,220

Fonte: Inventário GHG Protocol, Camargo Corrêa (2015)

Ou seja, apenas em 2015 a construtora emitiu aproximadamente 1 Mt CO₂e - cerca de 0,1% do total de 1.050 Mt CO₂ emitidos pelo país no mesmo ano.

Uma grande vantagem da ferramenta do GHG Protocol é seu poder de engajar grandes corporações no rastreamento e divulgação de seu impacto ambiental, além de trazer parâmetros para o estudo e análise comparativa entre empresas dos mais variados segmentos. A principal desvantagem é que o usuário deve introduzir a maioria dos dados (como fator de emissão de cada gás nas diferentes etapas da cadeia), o que exige detalhes dos processos e conhecimentos prévios de inventários de emissões de GEEs.

2.3.2 Athena EcoCalculator

O *Athena Sustainable Materials Institute* é uma organização sem fins lucrativos que faz pesquisas colaborativas para trazer dados e análises de ciclo de vida dos materiais do setor da construção, com o principal objetivo de reduzir a pegada ambiental na produção e consumo de matérias primas.

A Athena EcoCalculator é uma ferramenta, também em planilha Excel, que calcula a emissão de diferentes materiais, de acordo com os processos e insumos utilizados ao longo do ciclo de vida dos sistemas construtivos. A ACV inclui fases como extração de recursos e processamento, fabricação de produtos, construção dos sistemas, transporte, ciclos de manutenção e substituição, demolição do sistema e transporte para aterro sanitário.

Os dados são obtidos a partir da base do inventário de ciclo de vida dos Estados Unidos, que fornece dados como a quantidade de material utilizado e as emissões geradas em um determinado processo produtivo. Conforme especificado no site do Instituto, “o software contém dados referentes à América do Norte (...), mas pode ser adaptado para outras regiões, dependendo da disponibilidade de dados”. As principais diferenças citadas são “matrizes energéticas, processos de manufatura, distâncias de transporte e os métodos de construção utilizados”.

Tabela 4 - Sumário de Impacto Ambiental para um conjunto residencial em Toronto - Athena Eco Calculator

Conjunto	Área Total	Consumo de combustível fóssil (MJ)	Potencial de Aquecimento Global (GWP) (ton de CO ₂ eq)	Potencial de acidificação (moléculas de H + eq)	Crítérios de saúde humana (kg PM 10 eq)	Potencial de eutrofização (g N eq)	Potencial de destruição de ozônio (mg CFC-11 eq)	Potencial de poluição (kg O ₃ eq)
Fundações	3.175	91.059	10	2.537	42	1.939	61	536
Colunas e vigas	58	82.540	9	2.086	32	1.510	52	417
Pisos intermediários	1.445	140.892	10	2.322	28	5.115	0	291
Paredes externas	861	98.342	8	2.728	29	1.481	28	405
Janelas	244	78.971	8	5.059	148	2.038	28	753
Paredes internas	800	48.932	4	1.117	27	1.004	22	194
Telhado	1.130	204.967	14	4.030	61	5.296	2	315
Totais		745.704	62	19.879	368	18.382	194	2.911

Fonte: Research Gate (2012)

O resultado final dos cálculos é um resumo do impacto ambiental por elemento construtivo (fundações e sapatas, colunas e vigas, paredes, janelas, etc.), e traz diversos fatores, sendo o mais importante deles o total de toneladas de CO₂eq gerados por etapa.

Em relação à ferramenta GHG Protocol, a Athena EcoCalculator apresenta a vantagem de já trazer parâmetros de emissão para cada material, processo e vários sistemas construtivos. Apesar disso, os dados utilizados para cálculo são referentes a pesquisas e literatura da América do Norte, e as tecnologias e meios de obtenção de energia do Brasil são bastante diferentes (vide gráfico mostrando a diferença nas composições das matrizes energéticas brasileira e mundial).

2.3.3 Método QE-CO₂

Em sua dissertação de mestrado, Breno da Costa propõe um Método para a Quantificação das Emissões de CO₂ (Método QE-CO₂), aproveitando dados de fontes reconhecidas como IPCC, UNFCCC, BEN, além de artigos científicos e

publicações de associações e fabricantes, para chegar nos valores propostos de emissões por quantidade de produto utilizado, incluindo o fator de perda durante a obra e as emissões geradas pelo consumo de energia e transporte.

As emissões por unidade de material (m³ ou t) são calculadas a partir das emissões de CO₂ devido ao consumo de energia nas etapas de extração e processamento de matérias primas (Emissões_{EN1,i}) e na etapa de transporte de matéria prima para a edificação (Emissões_{TR1,i}), e multiplicadas pelos respectivos consumo (QT_j) e fator de perda (FP_j) estimados, como mostra a equação abaixo.

Equação 1 - Emissões por unidade de material

$$\text{Emissões}_{\text{MT1},j} = \text{QT}_j \times \text{FP}_j \times (\text{Emissões}_{\text{TR1},i} + \text{Emissões}_{\text{EN1},i})$$

Fonte: COSTA (2012)

O autor propõe três níveis de precisão para os cálculos: Básico (quando somente estão disponíveis valores médios, a nível nacional), Intermediário (a ser utilizado quando se tem acesso a informações mais específicas como distância percorrida pelos insumos) e Avançado (exige informações específicas das unidades fabris, como quantidade de insumos energéticos consumidos e quilometragem percorrida no transporte).

Como exemplo de cálculo utilizando o método, Costa (2012) traz os fatores de emissão de CO₂ para os principais materiais de uma obra, de acordo com o nível básico, na cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 5 - Fatores de emissão de CO₂ para os principais materiais de uma obra, de acordo com o nível básico, na cidade do Rio de Janeiro

(continua)		
Identificação	Unidade	Valor
Aço	t CO ₂ /t produto	1,845
Agregados miúdos	t CO ₂ /t produto	0,086
Alumínio (perfil)	t CO ₂ /t produto	4,441
Argamassas (média)	t CO ₂ /t produto	0,161

Tabela 5 - Fatores de emissão de CO₂ para os principais materiais de uma obra, de acordo com o nível básico, na cidade do Rio de Janeiro

			(conclusão)
Identificação	Unidade	Valor	
Cal hidratada	t CO ₂ /t produto	0,911	
Cerâmica (revestimento)	t CO ₂ /t produto	0,187	
Cerâmica (telhas e tijolos)	t CO ₂ /t produto	0,111	
Cimento	t CO ₂ /t produto	0,652	
Concreto (bloco)	t CO ₂ /t produto	0,184	
Concreto (piso intertravado)	t CO ₂ /t produto	0,27	
Concreto (tubo)	t CO ₂ /t produto	0,224	
Concreto (15MPa com cimento CP II-F-32)	t CO ₂ /m ³ produto	0,328	
Madeira na IPM, para HDF, MDF, MDP e OSB	t CO ₂ /m ³ produto	0,331	
Plástico (PVC)	t CO ₂ /t produto	0,615	
Vidro	t CO ₂ /t produto	0,844	

Fonte: COSTA (2012)

Os materiais com a maior emissão de CO₂ são, nessa ordem, o Alumínio (4,441 tCO₂/t), Aço (1,845 tCO₂/t), Cal virgem (1,184 tCO₂/t), Cal hidratada (0,911 tCO₂/t), Vidro (0,844 tCO₂/t), Gesso (0,766 tCO₂/m³) e cimento (0,652 tCO₂/t).

Neste caso, a principal vantagem do método proposto é a praticidade e acessibilidade dos cálculos - uma vez que para o nível de precisão básico não é necessário conhecer dados específicos e, mais do que isso, já foram levantados parâmetros de referência para cada um dos principais materiais. Essa característica torna os cálculos mais acessíveis a tomadores de decisão. Uma grande desvantagem do método é não levar em consideração a energia consumida pela obtenção de cada um dos materiais - conforme apontado no item 4.2.1, a geração de energia corresponde a 1/3 do CO₂ lançado à atmosfera no Brasil.

2.3.4 Emissão de CO₂ por Análise do Ciclo de Vida Energético

A ACVE é um método criado para simplificar as Análises do Ciclo de Vida de materiais, pelas ACVs exigirem um nível de análise de processos produtivos e

materiais bastante aprofundada (e portanto muito tempo e recursos) e, em paralelo, grande parte do impacto total identificado em ACVs ser decorrente do consumo de energia. Ao invés de englobar todos os processos e materiais utilizados, e diferentes níveis de impacto, uma ACVE observa o conjunto de insumos energéticos utilizados na fabricação e transporte dos materiais (ao qual se dá o nome de Energia Embutida Inicial), energia consumida durante a presença de habitantes (Energia Operacional), e insumos energéticos necessários para desconstrução da construção (Energia de Desconstrução).

Sérgio Tavares, em sua tese de doutorado, apresenta a já citada complexidade exigida em uma Análise do Ciclo de Vida, que é regida por normas ISO e consiste em análises abrangentes e que, muitas vezes, continuam não sendo holísticas, e traz as vantagens do uso de ACVEs, especialmente a redução de custos e tempo de execução e trazer resultados suficientemente precisos para orientar tomadores de decisão. Após apresentar essas vantagens, Tavares propõe uma análise da emissão de CO₂ através da energia embutida nas diferentes etapas da vida da edificação. Para essa análise, o autor divide o ciclo de vida das edificações em três etapas principais:

1. Fase Pré-Operacional: Levantamento da edificação e consumo intensivo dos materiais de construção
2. Fase Operacional: Presença de habitantes e hábitos consumidores de energia
3. Fase Pós-Operacional: Desconstrução (idealmente, com reaproveitamento dos materiais)

Tabela 6 - Fases e etapas do ciclo de vida energético das edificações residenciais

Fase	Etapas	Descrição
Pré - Operacional	1	Prospecção, fabricação e transporte de insumos
	2	Fabricação dos materiais de construção
	3	Transporte dos materiais de construção

Fonte: Adaptado de Tavares (2006)

Tabela 6 - Fases e etapas do ciclo de vida energético das edificações residenciais

Fase	Etapas	Descrição
Pré - Operacional	4	Energia consumida por equipamentos na obra
	5	Transporte dos trabalhadores até a obra
	6	Desperdício de materiais
	7	Transporte do desperdício
Operacional	8	Reposição de materiais
	9	Energia consumida por equipamentos eletrodomésticos
	10	Energia para cocção de alimentos
Pós - Op.	11	Demolição e remoção dos resíduos
	12	Transporte do material demolido

Fonte: Adaptado de Tavares (2006)

Uma grande vantagem do método proposto por Tavares é olhar para os processos da indústria da construção de forma holística, abarcando desde a extração da matéria prima, na fase Pré-Operacional, até o transporte do material demolido. Em comparação com o já apresentado Método QE-CO₂, que só investiga até o transporte dos materiais (etapa 3) e desconsidera a importância dos insumos energéticos, o método de cálculo de Emissão de CO₂ por ACVE é bem mais abrangente, tratando de fatores relevantes específicos aos métodos construtivos escolhidos, como o desperdício de materiais na obra, a energia consumida por equipamentos eletrodomésticos e o transporte do material demolido.

2.3.5 Escolha do Método de Quantificação dos Impactos

Já foi apontado, na apresentação de cada metodologia, os pontos favoráveis e desfavoráveis da adoção de cada uma em uma análise de impactos ambientais. No caso do presente trabalho, foi escolhida a metodologia proposta por Tavares, preferida pela maior ênfase em processos energéticos e, portanto, maior

confiabilidade nas emissões de materiais com grande utilização nos projetos adotados - como aço e ferro, alumínio, madeira e plásticos.

Como o próprio Tavares sugere em sua tese, a análise de algumas etapas depende de acesso a informações como o local de execução da obra, distâncias de transporte (dos materiais de construção, trabalhadores, desperdício e resíduos), padrão de consumo local (na cocção e equipamentos eletrodomésticos, além dos equipamentos utilizados em obra).

A aplicação já realizada da metodologia mostra que as etapas 1 e 2 (fabricação de insumos e materiais de construção) correspondem a cerca de 20% da energia total do ciclo de vida da edificação, chegando a 50% quando desconsiderados o uso de equipamentos e cocção de alimentos (etapas 9 e 10). Incluindo a energia de manutenção/reposição dos mesmos itens, as somas valem 35% e 80%, respectivamente.

Assim, a análise foi realizada considerando apenas as etapas relacionadas diretamente aos materiais de construção, conforme apontado abaixo.

Tabela 7 - Etapas selecionadas para análise

Fase	Etapas	Descrição
Pré - Operacional	1	Prospecção, fabricação e transporte de insumos
	2	Fabricação dos materiais de construção
Operacional	6	Desperdício de materiais
	8	Reposição de materiais

Fonte: Adaptado de Tavares (2006)

Com isso, a equação para o cálculo engloba apenas a parcela de prospecção e fabricação dos materiais (EE_{mat}) e de reposição (EE_{rep}), tomando a seguinte forma:

Equação 2 - Cálculo da Energia Embutida total nas etapas pré-operacional e operacional

$$EE_{tot} = EE_{mat} + EE_{rep}$$

$$EE_{tot} = \sum_{i=1}^n (m_i \cdot CEmat_i) + \sum_{i=1}^n (E_{pre\ i} \cdot rep_i \cdot CEmat_i)$$

$$EE_{tot} = \sum_{i=1}^n (m_i \cdot CEmat_i) \cdot (1 + rep_i)$$

Sendo:

i = material discriminado

m_i = quantidade de material de construção utilizado (kg)

$CEmat_i$ = conteúdo energético do material discriminado (MJ/kg)

$E_{pre\ i}$ = energia pré-operacional do material de construção

rep_i = fator de reposição do material ao longo da vida útil da edificação

A energia utilizada na fabricação dos insumos pode ser transformada em emissão de gases, de acordo com a fonte utilizada para a obtenção dessa energia e a emissão de cada fonte. Segundo dados de 2019 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a geração elétrica brasileira emitiu 56,3 milhões de t CO₂ no ano.

Tabela 8 - Geração de CO₂ por fonte de energia

Fonte	CO ₂ (kg/GJ)
Coque de carvão mineral	92,0
Lenha	81,6
Óleo combustível	76,3
Coque de petróleo	72,6
GLP	63,3
Gás natural	52,4
Carvão vegetal	51,0
Outras	35,7
Eletricidade	18,1

Fonte: Adaptado de IPCC (1995 e 2006)

Ou seja, olhando mais de perto para a matriz energética brasileira, apesar do alto índice de fontes renováveis quando comparada com países mais desenvolvidos, quase 50% da oferta interna de energia é composta pelas fontes com maior emissão (carvão mineral, lenha e carvão vegetal, e petróleo e derivados), segundo o BEN (2021).

Olhando especificamente para os materiais da construção civil, a situação fica ainda mais crítica - segundo Tavares (2006), em média 70% dos insumos para a fabricação dos materiais vêm de fontes fósseis não renováveis, e mesmo as fontes renováveis têm uma parcela relevante de emissões, pela origem dos materiais.

Além da energia embutida gerando a emissão de gases, alguns dos insumos mais utilizados na construção ainda liberam CO₂ por conta de suas reações químicas.

Tabela 9 - Geração de CO₂ durante o processo de fabricação, por material

Material	t CO₂/t
Alumínio	1,6
Cal	0,76
Cimento	0,375
Concreto	0,045

Fonte: Adaptado de Tavares (2006)

Somando as emissões por energia de fabricação às emissões não energéticas, é possível analisar a geração total de CO₂ para cada um dos principais materiais utilizados.

Tabela 10 - Geração total de CO₂ por material

Material	(conclusão)		
	Geração de CO ₂ Energético (t CO ₂ /t)	Geração de CO ₂ Não Energético (t CO ₂ /t)	Geração Total de CO ₂ (t CO ₂ /t)
Aço e ferro	2,247		2,25
Alumínio	4,268	1,60	5,87
Argamassa	0,161		0,16
Cerâmica revestimento	0,264		0,26
Cerâmica vermelha	0,227		0,23
Concreto armado	0,088	0,05	0,13
Concreto simples	0,088	0,05	0,13
Fibra de vidro ¹	1,288		1,29
Fibrocimento	0,425		0,42
Gesso ¹	0,215		0,21
Lã mineral ¹	1,019		1,02
Madeira (simples) ¹	0,188		0,19
Madeira (MDF) ¹	0,483		0,48
Madeira (porta) ¹	0,188		0,19
Plásticos	4,992		4,99
Tinta (interiores)	4,491		4,49
Tinta (exteriores)	4,491		4,49

Fonte: Adaptado de IPCC (1995 e 2006)

Além de colocar em evidência a importância da análise de emissões pelo ciclo de vida energético - apenas a cal e o cimento não têm a maior parcela das emissões originadas devido aos insumos energéticos utilizados, a tabela mostra que os principais emissores por tonelada de material utilizado são os produtos mais industrializados.

Comparando com os valores encontrados no método anterior (COSTA, 2012), é possível encontrar diferenças relevantes exatamente nos materiais mais industrializados.

Tabela 11 - Comparação de emissões para Costa (2012) e Tavares (2006)

Material	Costa (t CO₂/t)	Tavares (t CO₂/t)	Δ
Aço e ferro	1,85	2,25	-18%
Alumínio	4,44	5,87	-24%
Areia	0,09	0,00	2072%
Argamassa	0,17	0,16	3%
Cal	0,91	0,99	-8%
Cerâmica revestimento	0,19	0,26	-29%
Cerâmica vermelha	0,11	0,23	-51%
Cimento	0,65	0,64	2%
Concreto	0,14	0,13	3%
Madeira	0,31	0,62	-51%
Plásticos	0,62	4,99	-88%

Fonte: Adaptado de Costa (2012) e Tavares (2006)

Essas diferenças se dão devido à diferente abordagem adotada por cada autor, sendo o trabalho de Costa mais focado nas etapas de transporte de materiais e emissões não energéticas, e Tavares trazendo uma visão ampla a partir da análise de ciclo de vida energético - dando mais ênfase aos processos fabris (e fazendo com que materiais como plásticos, madeira para chapas e alumínio, que passam por diversos tratamentos e consomem bastante energia nos processos, apresentem as maiores emissões).

2.4. MÉTODOS CONSTRUTIVOS ESCOLHIDOS

Os métodos construtivos escolhidos para o comparativo foram o método de paredes de concreto e o *Wood Framing*, mais especificamente o *Light Wood Framing*. O primeiro foi escolhido por ter surgido como uma alternativa à alvenaria convencional, proporcionando a realização de obras de forma mais rápida, eficiente e com menos resíduos, e atualmente utilizado em larga escala em empreendimentos do Casa Verde e Amarela. Já o segundo foi escolhido por ser um método largamente utilizado em países desenvolvidos, inclusive com altas amplitudes térmicas, por ter sua eficiência térmica e acústica já comprovada, e por ser uma realidade no Brasil, já homologado pelo DATEC e utilizado em empreendimentos do Casa Verde e Amarela

2.4.1 Método construtivo de paredes de concreto

As construções com paredes de concreto são muito comuns em países como Chile, Colômbia e México. Nesse modelo construtivo, as paredes são moldadas *in loco* em concreto armado com o auxílio de fôrmas modulares. Esse sistema possui vantagens em termos de prazos, custos e qualidade, além de otimizar a mão-de-obra, reduzir entulhos, e permitir maior desempenho e industrialização no processo, de acordo com Nunes (2011).

Segundo Cardoso (2015), após a montagem, as fôrmas modulares são preenchidas com concreto, já com as armaduras, instalações elétricas e instalações hidráulicas embutidas nas paredes. Outra característica marcante do sistema é o fato de que a vedação e a estrutura correspondem a um único elemento.

Figura 1 - Fôrmas de paredes de concreto



Fonte: Ulma Construction

Figura 2 - Construção em paredes de concreto



Fonte: Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE)

2.4.2 Representatividade do método no Brasil

O uso desse sistema no Brasil se intensificou a partir de 2009, com a criação do programa habitacional “Minha Casa Minha Vida” (MCMV), hoje o “Casa Verde e Amarela” (CVA). O programa fez com que as construtoras saíssem em busca de

sistemas construtivos mais econômicos, produtivos e que não comprometessem a qualidade e desempenho das edificações, de acordo com Nunes (2011).

Segundo Cardoso (2015), entre os sistemas utilizados no MCMV, o de paredes de concreto ganhou muito destaque e, em 2012, o sistema foi normatizado pela NBR 16.055 da ABNT – Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e Procedimentos. A existência de uma norma técnica nacional para esse método estimulou ainda mais seu uso pelas construtoras, que muitas vezes não o utilizavam por falta de uma referência técnica padronizada.

Segundo Nunes (2011), as paredes de concreto vêm conquistando o mercado brasileiro por oferecerem todas as vantagens de um sistema construtivo voltado à produção em larga escala. Apesar disso, Cardoso (2015) traz que, mesmo sendo vantajoso em muitos aspectos, o método consome altos volumes de aço e concreto e grandes quantidades de energia durante o seu processo.

2.4.3 Método construtivo Wood Framing

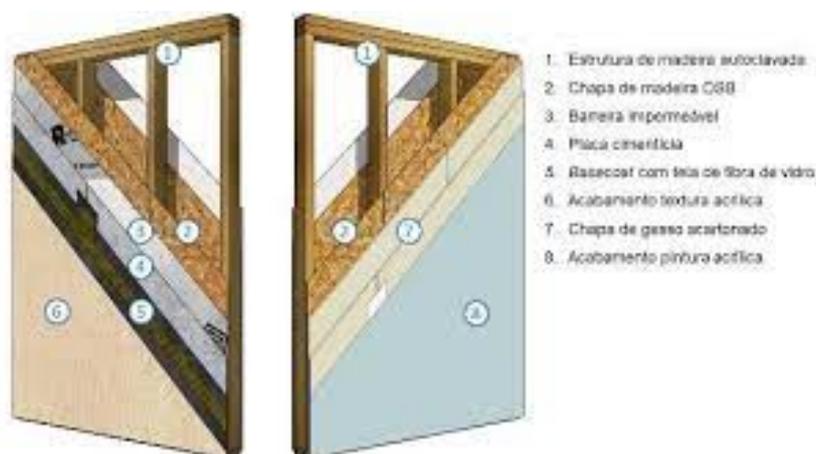
O sistema *Wood Framing* é um método que se diferencia de outros sistemas pré-fabricados pela utilização de *frames*, ou paredes estruturais, de madeira de florestas plantadas (no caso do Brasil, as principais espécies utilizadas são a pinus e eucalipto). O método é industrializado, o que significa que a fabricação e montagem dos painéis é feita em indústria. Isso reduz não só o tempo de construção da obra, mas também a quantidade de resíduos gerados, a água utilizada e o volume de CO₂ emitido nas etapas estruturais.

A metodologia construtiva varia de acordo com o local, pois depende de normas vigentes, materiais, maquinário, ferramentas e mão de obra disponível, características da edificação, entre outros. No Brasil, as edificações que utilizam esse sistema obedecem o DATec nº20, documento oficial de avaliação técnica que homologa o método construtivo de *light Wood Framing* no Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-H).

Seguindo as diretrizes propostas no documento, o sistema segue as seguintes etapas de construção:

1. Produção do *frame*, ou moldura, é o perfil de madeira utilizado para construir a parede estrutural. Ele é feito de madeira estrutural com dupla secagem tratada com preservantes químicos que garantem sua durabilidade e sua resistência a agentes externos;
2. Fechamento dos painéis com chapas OSB (*Oriented Strand Board*), que são placas compostas por tiras de madeira de reflorestamento com grande resistência mecânica. Essas chapas recebem tratamento anti cupim e a aplicação de uma membrana hidrófuga. As placas das paredes internas ainda ganham uma camada de gesso acartonado;
3. Inserção da parte elétrica e hidráulica nos *frames* ainda em fábrica;
4. Fixação das chapas e usinagem das aberturas para fechamento dos painéis;
5. Finalização e carregamento dos painéis fechados até o canteiro;
6. Montagem dos painéis e do telhado no canteiro;
7. Acabamento interno, externo e de piso.

Figura 3 - Estrutura do painel de *Light Wood Framing*



Fonte: DATec nº 20 (2020)

2.4.4 Representatividade do método no Brasil

O *Wood Framing* é um método já consolidado em vários países e usado principalmente nos Estados Unidos, Canadá, Japão, Nova Zelândia e Alemanha. Vale reparar que todos os países citados são desenvolvidos e têm grandes amplitudes térmicas, o que reforça sua eficiência térmica.

No Brasil algumas construtoras já aderiram ao *Wood Framing* e fizeram parcerias com a Tecverde Engenharia, a única empresa brasileira que produz e constrói utilizando esse método. A Tecverde é detentora do DATec nº 20 mencionado anteriormente, o que, para Cardoso (2015), é algo de extrema relevância para que o sistema seja visto como alternativa real aos métodos convencionais. Mesmo assim, desde a publicação do DATec nº20 em 2012 até a data de publicação deste trabalho, o total de unidades habitacionais produzidas pela empresa ainda é cerca de 5.000, correspondente a um total de 175.000 m². Comparando com os mais de 4,5 milhões de unidades habitacionais construídas apenas ao programa Minha Casa Minha Vida, entre 2009 e 2016 (segundo dados de 2017, de Moreira *et al.*), fica nítido como a participação do sistema construtivo no Brasil ainda é muito modesta.

O DATec nº20 estabelece o limite de quatro pavimentos para edificações nesse modelo construtivo, o que é um fator limitante para seu uso em diversos tipos de edifícios, porém não para o padrão de habitação social. Nesses casos, o método já é utilizado, mas a existência de normas ou incentivos nacionais poderiam tornar o sistema ainda mais atrativo para construtores. Por hora, o *Wood Framing* ainda enfrenta muitos preconceitos e não é visto como uma alternativa a ser usada em larga escala. Cardoso (2015) afirma que o preconceito cultural não só dificulta a aplicação do sistema na construção civil brasileira, mas também o encarece, pois “faz com que a maioria dos fornecedores e fabricantes de produtos específicos sejam empresas estrangeiras, o que agrega custo à edificação” (idem).

3. METODOLOGIA

Conforme já apresentado no item 2.3.5, a análise proposta tem foco nos materiais com a maior emissão de CO₂ ao longo da etapa pré-operacional (até a habitação).

3.1 MÉTODO DE CÁLCULO

A fórmula para cálculo da emissão em cada método construtivo (CO_2^{tot}) foi adaptada de Tavares (2006), tendo sido isoladas as fases pré-operacionais de prospecção e fabricação de insumos e fabricação dos materiais, juntamente com os desperdícios de cada insumo, e a fase pós-operacional de reposição de materiais.

Equação 3 - Cálculo de emissão total de CO₂ por método construtivo na etapa pré-operacional

$$CO_2^{tot} = \sum_{i=1}^n (m_i \cdot CO_2^{mat}_i) \cdot (1 + desp_i) \cdot (rep_i)$$

Sendo:

i = material discriminado

m_i = quantidade de material de construção utilizado (em toneladas)

$CO_2^{mat}_i$ = emissão de CO₂ do material discriminado, segundo Tabela 11

$desp_i$ = fator de desperdício do material durante a etapa de obra

rep_i = fator de reposição do material ao longo da vida útil da edificação

O último dado, de fator de reposição, foi obtido também da pesquisa de Tavares, que aproveita dados informados por fabricantes de cada um dos materiais, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Fatores de reposição

Material	Fator de Reposição
Aço e ferro	2,78
Alumínio	1,00
Argamassa	1,00
Cerâmica revestimento	1,68
Cerâmica vermelha	1,68
Concreto armado	1,00
Concreto simples	1,00
Fibrocimento	1,25
Madeira (MDF)	1,00
Madeira (porta)	1,00
Plásticos	1,11
Tinta (interiores)	4,17
Tinta (exteriores)	6,52

Fonte: Adaptado de Tavares (2006)

Como explicado no item 2.3.5, a análise dos resultados e discussão só será feita para o método de Tavares, graças à maior confiabilidade do método de ACVE em relação ao método de Costa, que dá menor relevância às particularidades dos insumos energéticos, percebidas como sendo vitais para a análise.

A quantidade de cada material foi obtida nos quantitativos dos projetos apresentados, primeiro por etapa de construção e em seguida considerando o total ao longo da obra.

3.2 PROCESSO DE CÁLCULO

O ponto de partida para os cálculos foram os quantitativos de cada projeto. Tendo eles em mão, classificou-se cada composição em etapas, de acordo com a lista abaixo, e categorias, de acordo com os itens dispostos na Tabela 11.

1. Infraestrutura
2. Supraestrutura
3. Esquadrias
4. Cobertura
5. Impermeabilizações
6. Revestimentos
7. Pavimentação
8. Pintura

Os cálculos foram realizados para cada um dos sistemas construtivos, e os resultados estão disponíveis nos Apêndices 1, 2 e 3. Cada material tem sua unidade de medida, tendo sido dada preferência para as unidades de peso (kg) e volume (m^3), mas utilizada a superfície (m^2) nos casos em que os demais não foram possíveis. Os valores que se encontram em volume e superfície foram transformados em kg de acordo com dados disponíveis no trabalho de Tavares, e apresentados também no Apêndice 6.

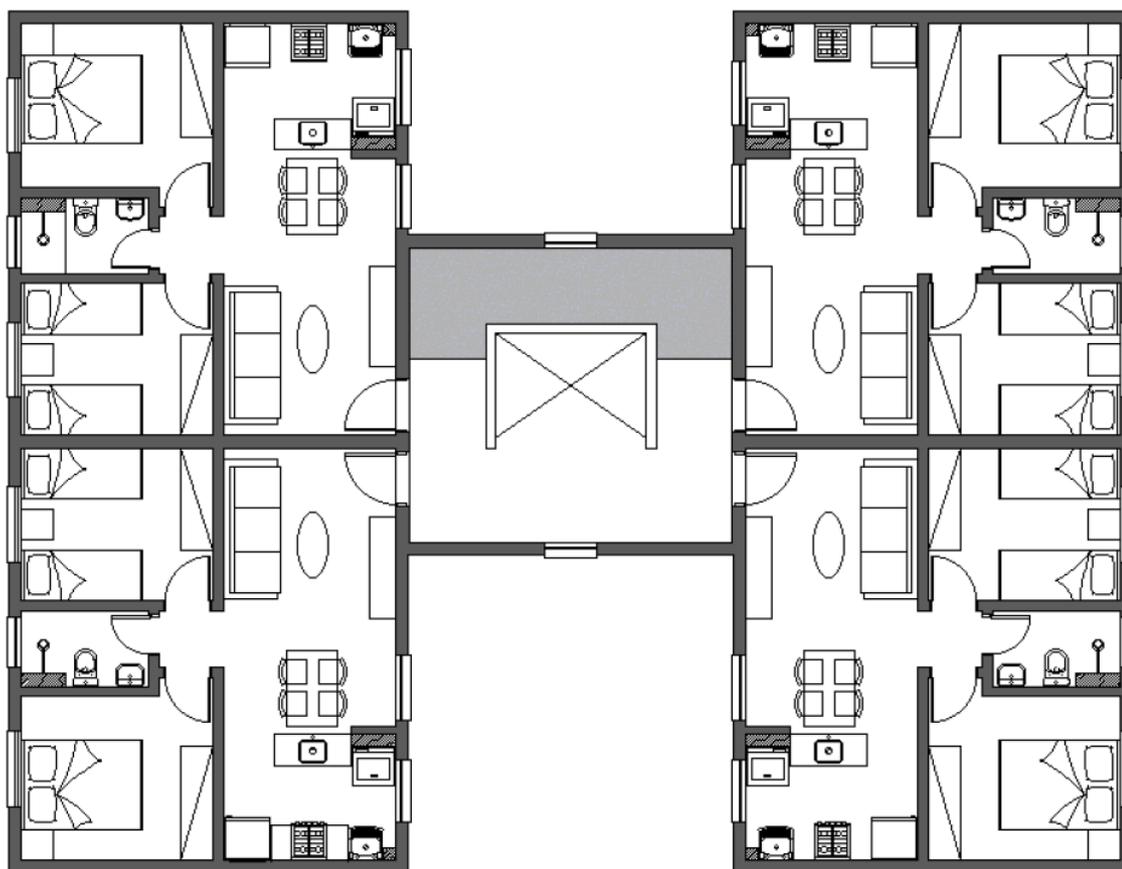
O produto dos valores e conversões são o peso utilizado em cada etapa e no total, para cada material analisado. Esse peso foi transformado de quilogramas para toneladas e então multiplicado pelos valores da Tabela 11, para encontrar a emissão de CO_2 por etapa e material discriminados.

3.3 OBJETO DE ESTUDO

Para a análise comparativa da emissão de carbono de dois métodos construtivos diferentes foram utilizados dois projetos semelhantes de prédios de 4 pavimentos.

O prédio construído em *Wood Framing* que foi utilizado possui 4 pavimentos com 4 apartamentos. Cada unidade habitacional tem 42,7 m² de área privativa, tendo dois quartos, uma sala de estar e jantar, um banheiro e uma cozinha com lavanderia. Na figura abaixo temos a planta baixa desse prédio, ele pertence ao portfólio de projetos padrão da Tecverde.

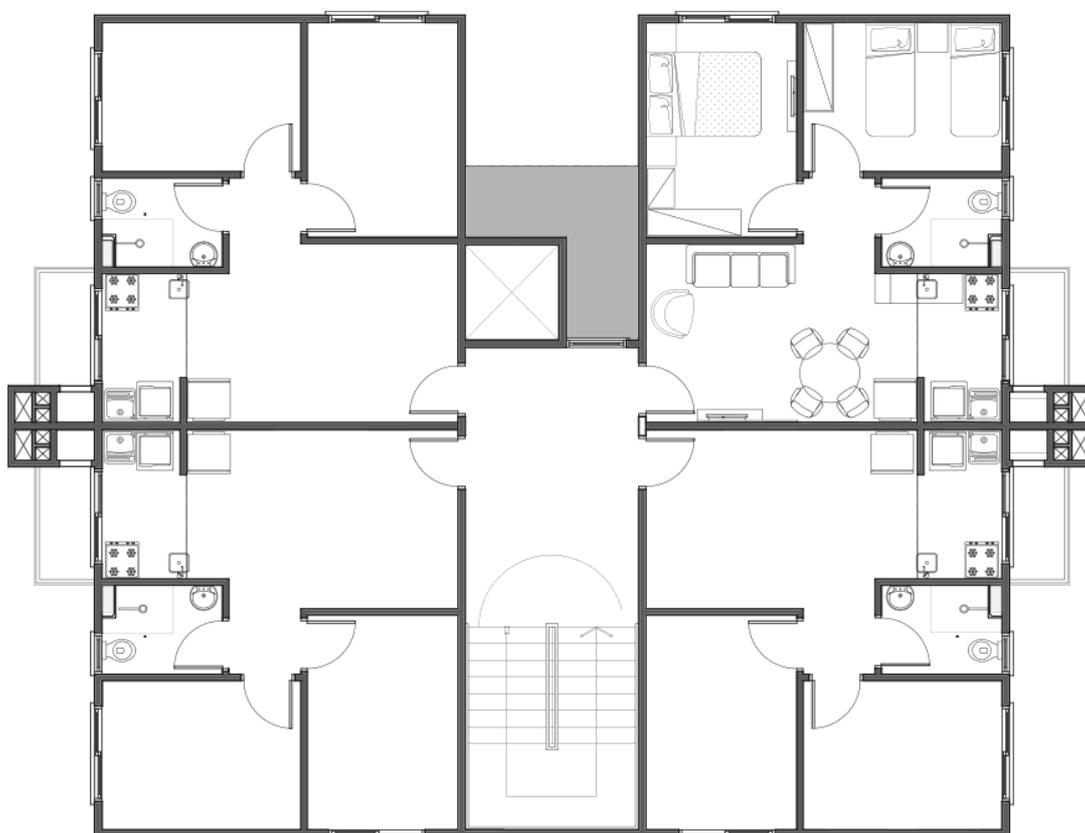
Figura 4 - Planta baixa do projeto do prédio construído em *Wood Framing*



Fonte: Tecverde (2021)

Já o projeto do prédio construído em paredes de concreto foi disponibilizado por uma construtora que preferiu se manter anônima, mas vale destacar que é um projeto padrão que já foi utilizado na construção de empreendimentos com centenas de unidades. O prédio também é composto por 4 pavimentos de 4 unidades habitacionais por andar tipo, sendo que cada apartamento tem 45,18 m². Como mostra a imagem abaixo, cada unidade é composta por sala de estar e jantar, cozinha com lavanderia, um banheiro, dois quartos e uma sacada.

Figura 5 - Planta baixa do projeto do prédio construído em paredes de concreto



Fonte: Anônima (2021)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de resultados foi dividida em três partes: primeiramente, a realização dos cálculos descritos no item 3.2, seguida pelos principais resultados retirados da aplicação, e finalmente apontamentos sobre esses resultados. As principais tabelas intermediárias geradas durante o primeiro passo estão no item 4.1 e 4.2, e as demais são apresentadas como Apêndices ao trabalho.

4.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

As Tabelas de quantitativos levantados, disponíveis no Apêndice 1, mostram um maior consumo pelo método de Paredes de Concreto, de todos os materiais exceto a madeira, utilizada apenas nas coberturas e portas do método, e presente em toda a supraestrutura para o caso do *Wood Framing*, e do alumínio, utilizado em maior volume nas esquadrias do segundo método. Realizando as multiplicações pelos fatores de conversão, desperdício e reposição, conforme já explicados, fica bem evidente a diferença nos consumos de cada método.

A Tabela 13 já inclui desperdícios na produção dos materiais e reposições ao longo da vida útil da edificação, conforme apresentado no Apêndice 6.

Tabela 13 - Consumo de materiais por método, em toneladas
(continua)

Material	Paredes de Concreto	<i>Wood Framing</i>
Aço e ferro	12,88	0,26
Alumínio	7,24	3,51
Argamassa	34,26	1,90
Cerâmica revestimento	13,91	27,04
Cerâmica vermelha	0,00	5,86

**Tabela 13 - Consumo de materiais por método, em toneladas
(conclusão)**

Material	Paredes de Concreto	Wood Framing
Concreto armado	811,20	0,00
Concreto simples	0,00	382,66
Fibra de vidro	0,00	0,00
Fibrocimento	5,91	0,00
Gesso	0,00	124,84
Lã mineral	1,76	0,00
Madeira (simples)	21,10	2,75
Madeira (MDF e OSB)	0,00	83,85
Madeira (porta)	14,20	12,67
Plásticos	0,17	0,08
Tinta (interiores)	3,98	3,94
Tinta (exteriores)	1,02	1,45

Fonte: Dos autores (2021)

A Tabela 13 mostra um grande consumo de concreto em ambos os métodos - no caso das Paredes de Concreto, o concreto armado, utilizado especialmente na supraestrutura da edificação, e no caso do *Wood Framing* o concreto simples, na etapa de infraestrutura. Também chama a atenção o grande consumo de gesso no segundo método, utilizado em chapas como revestimento das placas de madeira, segundo o DATec n° 20-D.

Aplicando as emissões discriminadas na Tabela 11 para os consumos apontados na Tabela 13, é possível verificar os efeitos de cada material utilizado.

Tabela 14 - Emissão de CO₂ por método (t CO₂)

Material	Paredes de Concreto	Wood Framing
Aço e ferro	28,93	0,59
Alumínio	42,46	20,60
Argamassa	5,51	0,31
Cerâmica revestimento	3,67	7,13
Cerâmica vermelha	0,00	1,33
Concreto armado	108,15	0,00
Concreto simples	0,00	51,02
Fibra de vidro	0,00	0,00
Fibrocimento	2,51	0,00
Gesso	0,00	26,79
Lã mineral	1,79	0,00
Madeira (simples)	3,96	0,52
Madeira (MDF e OSB)	0,00	40,49
Madeira (porta)	2,67	2,38
Plásticos	0,87	0,40
Tinta (interiores)	17,89	17,70
Tinta (exteriores)	4,60	6,50

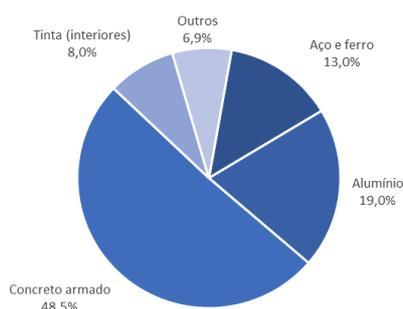
Fonte: Dos autores (2021)

Os resultados serão analisados e discutidos com maior profundidade nas seções seguintes, mas é interessante perceber como os materiais com maior participação nas emissões são também os mais industrializados, como o alumínio, concreto, aço e ferro, madeiras industrializadas, gesso e tintas. Também chama a atenção a diferença entre as composições, graças ao maior consumo de concreto armado no primeiro método, e de madeira industrializada no segundo.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme já citado, na Tabela 14 é possível identificar o grande impacto dos materiais “primários” a cada método, concreto armado no caso das Paredes de Concreto, e as chapas de Madeira Industrializada (MDF e OSB) no *Wood Framing*.

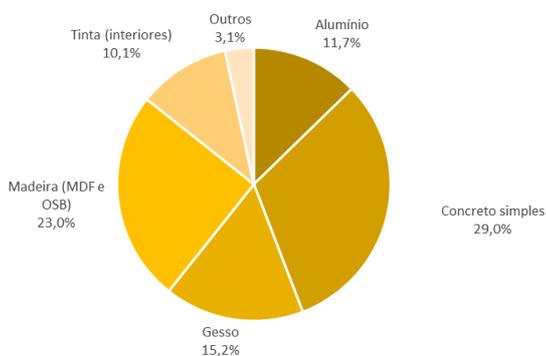
Gráfico 11 - Participação nas emissões totais de Paredes de Concreto, por material



Fonte: Dos autores (2021)

No caso das Paredes de Concreto, a emissão dos insumos que compõem os elementos estruturais (concreto, aço e ferro), utilizados tanto na infra quanto na supraestrutura, corresponde a mais de 60% do total de CO₂ gerado. Já para o *Wood Framing*, os elementos estruturais de concreto simples (29%) e madeira (23%), utilizados na infra e supraestrutura, respectivamente, são os principais emissores.

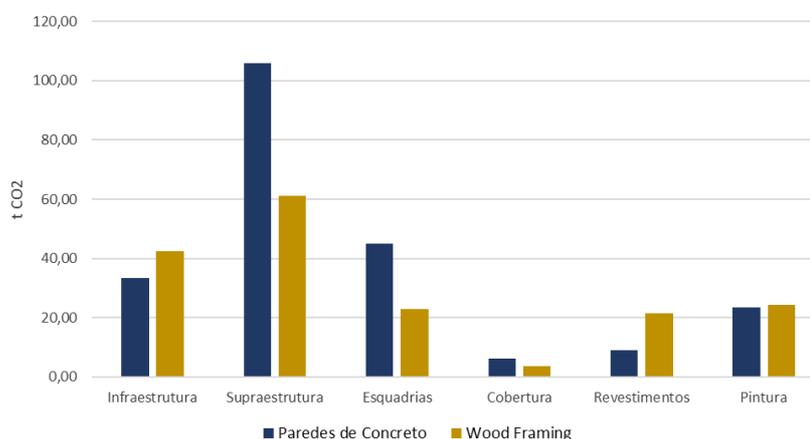
Gráfico 12 - Participação nas emissões totais de *Light Wood Framing*, por material



Fonte: Dos autores (2021)

Também chama a atenção como, em ambos os casos, a participação de materiais industrializados, especialmente os alumínio presentes nas esquadrias e a tinta própria para acabamento de interiores são relevantes, correspondendo em conjunto a pouco mais de 20% das emissões para cada projeto. No caso das chapas de madeira, a participação do elemento isolante de gesso tem uma emissão relevante, mas que posteriormente na vida útil da edificação acarreta uma economia na energia utilizada para aquecimento e resfriamento, graças às suas propriedades térmicas.

Gráfico 13 - Total de emissões por etapa de obra e método



Fonte: Dos autores (2021)

O Gráfico 13 mostra como a supraestrutura é de fato a grande responsável pelas emissões, em ambos os métodos, mas especialmente no caso do tradicional. Para a alternativa de *frames* de madeira, é interessante ver a relevância do uso do concreto, mesmo sendo apenas utilizado para as fundações.

Somando os efeitos de todas as etapas e materiais para cada um dos métodos, o efeito de um prédio de Paredes de Concreto é de 223,0 t CO₂, ou cerca de 0,31 t CO₂/m² (como os prédios têm metragens distintas, é interessante comparar em termos relativos ao metro quadrado construído). Já o projeto de *Wood Framing* emitiria 175,7 t CO₂, ou 0,26 t CO₂/m². A diferença entre as emissões relativas para cada método é de cerca de 20%.

Tabela 15 - Emissões totais de CO₂, por método

Tipo de Emissão	Paredes de Concreto	Wood Framing	Δ
Absoluta (t CO ₂)	223,0	175,7	47,3 (27%)
Relativa (t CO ₂ /m ²)	0,31	0,26	0,05 (20%)

Fonte: Dos autores (2021)

Comparando as diferenças entre os valores de emissões totais com o Gráfico 13, é possível identificar que esse valor deriva praticamente da etapa de supraestrutura, que tem uma emissão de 47,28 t CO₂ a mais no método de *Wood Framing*, ou 0,06 t CO₂ por m² - valores bem próximos às diferenças identificadas.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O trabalho de Tavares (2006), utilizado como referência, apresenta uma média de 86,4 t CO₂ emitidas na etapa de obra de uma habitação unifamiliar (o que o autor chama de Energia Embutida Total, ou “EE total”), ou 0,52 t CO₂ por m² construído. A divergência entre os resultados relativos (emissão por m²) pode ser explicada pela diferença entre os projetos: enquanto Tavares analisa o projeto de uma casa, o presente estudo utilizou os quantitativos de prédios de apartamentos e, portanto, inclui áreas comuns e equipamentos que não existem no original, como escadas, além das estruturas serem mais robustas e demandarem mais materiais.

Tabela 16 - Emissões totais de CO₂, em comparação com Tavares

Tipo de Emissão	Paredes de Concreto	Wood Framing	Tavares (2006)
Absoluta (t CO ₂)	223,0	175,7	86,4
Relativa (t CO ₂ /m ²)	0,31	0,26	0,52

Fonte: Dos autores (2021) e Tavares (2006)

Já a diferença entre as emissões relativas pode ser justificada pela análise realizada focar em etapas que poderiam apresentar diferenças significativas nos quantitativos pela escolha do método construtivo, tendo sido desconsideradas as etapas de instalações hidrossanitárias e elétricas e de instalação de acabamentos como louças, metais e outros equipamentos, que constam no estudo original.

4.3.1 O déficit habitacional brasileiro e impactos em escala

“Déficit habitacional” é o termo utilizado para se referir ao número de famílias que não têm acesso à moradia ou vivem em condições precárias de habitação. O segundo grupo é composto por moradias de materiais não duráveis, em situação de risco ou com número excessivo de pessoas no espaço. Moradias sem acesso a esgoto, luz, água encanada ou outros serviços básicos não estão incluídos no déficit.

De acordo com dados de 2021 do Governo Federal, o déficit habitacional brasileiro medido em 2019 era de 5,8 milhões de moradias - e vem se mantendo nesse patamar desde 2016, apesar de esforços para a redução, como os programas habitacionais Minha Casa Minha Vida (que durou de 2009 a 2020) e Casa Verde e Amarela (em vigor desde agosto de 2020).

Segundo o Governo Federal, em 1 ano de CVA foram entregues cerca de 390 mil moradias (uma média de 32.500 unidades por mês), enquanto os números do MCMV foram, entre maio de 2009 e julho de 2019, 4,3 milhões de moradias (ou cerca de 35.250 unidades mensais).

Considerando os projetos utilizados como sendo padrões para o programa, é possível comparar as emissões geradas mensalmente e anualmente para cada um dos métodos - tanto para uma média de 35 mil unidades entregues mensalmente quanto para atender ao déficit habitacional de 5,8 milhões de unidades nos próximos anos.

Considerando que os projetos analisados são compostos por 16 residências unifamiliares, o valor de emissão absoluta total foi dividido por unidade para essa análise.

Tabela 17 - Emissão total de CO₂ para cenários de unidades construídas

Caso	Paredes de Concreto	Wood Framing	Δ
Emissão por moradia (t CO ₂)	13,9	11,0	2,9 (27%)
Média de moradias/mês		35.000,0	
Emissão mensal (t CO ₂)	487,8	384,4	103,4
Emissão anual (t CO ₂)	5.854,2	4.613,2	1.241,0
Déficit habitacional		5.800.000,0	
Emissão total déficit (t CO ₂)	80.843.042,5	63.705.593,9	17.137.448,5

Fonte: Dos autores (2021)

Portanto, considerando a velocidade atual de construção de habitações apenas em programas sociais, seria possível poupar a atmosfera de pouco mais de 100 toneladas de CO₂ por mês, ou 1,2 mil toneladas por ano, com uma simples mudança do sistema construtivo. Reproduzindo o resultado para os 5,8 milhões de moradias demandadas para dar condições básicas a toda a população, o montante de CO₂ poupado seria de cerca de 17 Mt CO₂.

5. CONCLUSÃO

Em meio ao cenário de mudanças cada vez maiores e menos reversíveis na temperatura global, e das comprovações dos efeitos antrópicos nessa situação, é essencial encontrar maneiras de reduzir o impacto no planeta, seja buscando alternativas tecnológicas aos materiais e atividades com maior emissão de poluentes e extração de recursos naturais, seja criando incentivos a essas tecnologias para que sejam mais amplamente utilizadas.

5.1. REVISÃO DOS RESULTADOS

O tópico 4.2 apresenta os impactos causados por cada material e etapa, para ambos os métodos. De maneira resumida, as principais conclusões são:

1. Emissões por material:

- a. Os materiais com maior emissão, em ambos os métodos, são os materiais utilizados na estrutura (infra e supra), correspondendo a cerca de 60% das emissões em cada método - concreto e aço e ferro, no caso de estruturas com concreto, e chapas de madeira, gesso e concreto, no caso da alternativa tecnológica.
- b. Ainda falando da estrutura, é interessante notar como o concreto corresponde a quase 1/3 das emissões do método de *Light Wood Framing*, mesmo sendo utilizado apenas na infraestrutura.
- c. Em ambos os casos, é também relevante o impacto das esquadrias de alumínio e das tintas utilizadas nos interiores da edificação, que juntos somam pouco mais de 20% das emissões em cada método.

2. Emissões por etapa:

- a. Em ambos os casos, a etapa com a maior emissão é a supraestrutura, mas é importante ressaltar a diferença - o método de *Wood Framing* emite menos de 60% do que o de Paredes de Concreto nesta etapa.

3. Emissões totais:

- a. Tanto em termos absolutos quanto relativos (por m²), o método de Paredes de Concreto apresenta uma emissão total superior à de *Wood Framing*, com 20% mais emissões por m².

4. Implicações em escala:

- a. Os resultados obtidos apontam que é possível deixar de lançar à atmosfera pelo menos 2,9 t CO₂ por moradia construída por programas habitacionais, o que corresponde a mais de 1.200 t CO₂ quando considerada a construção de 35 mil moradias/mês, número bastante próximo à média da última década.

Comparando com os dados do SEEG apresentados na introdução, de 1,4 bilhões de toneladas de CO₂ emitidas pela construção civil em 2018, as 1,2 mil toneladas poupadas podem parecer irrelevantes (menos de 0,1%), mas são a economia gerada por uma mudança bastante simples e que promove, além de um resultado estético bastante similar, maior desempenho térmico e acústico - gerando uma economia ainda maior na etapa de uso da edificação.

É interessante também levar em consideração os efeitos compostos dessas pequenas escolhas - como resultado das mudanças no clima, o Brasil vive a pior seca em quase um século, e com isso a matriz energética, antes majoritariamente renovável graças às hidrelétricas, tem dependido mais de fontes fósseis e não-renováveis. Dessa forma, pequenas alterações fazem parte de uma cadeia grande o suficiente para causar impactos bastante relevantes ao final do ciclo.

5.2. PRÓXIMOS PASSOS

Da perspectiva das NDCs, os compromissos nacionais de colaboração em direção à sustentabilidade ambiental, o Brasil está em falta exatamente de um plano com ações concretas que permitam ao país alcançar os valores aos quais se comprometeu. Segundo o Climate Action Tracker, que acompanha e avalia as NDCs de cada país, o Brasil não tem nada além de uma meta de redução, ao contrário do que as boas práticas recomendam (como adoção de definições, setores de foco e planos de ação para atingir os valores propostos).

A elaboração de análises que forneçam embasamento teórico se tornam, portanto, cada vez mais importantes. Seja para a tomada de decisões de empresários e diretores de negócios de todos os portes, ou para a criação de diretrizes e planejamentos por parte das entidades governamentais, essas análises tornam mais palpáveis os impactos das decisões tomadas por cada um desses agentes.

Da mesma forma que o trabalho e a metodologia apresentados por Tavares abriram as portas para uma análise mais acessível dos impactos ambientais do setor da Construção, é importante que outros setores tenham trabalhos análogos, a fim de trazer de forma concreta o tópico ambiental para as decisões. Também é relevante a elaboração de estudos de caso que tragam esses impactos na prática, e olhem para os dados e resultados obtidos de uma perspectiva de evolução, como um mecanismo para verificar se o país está ou não se aproximando das metas estabelecidas.

Finalmente, é essencial a participação da comunidade acadêmica e científica na conscientização popular e cobrança do Governo por ações alinhadas não apenas aos compromissos nacionais, mas também à preservação do planeta e dos recursos naturais. Sustentabilidade é, afinal, a capacidade de “atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as futuras gerações também satisfazerem suas necessidades”.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-ver-sao-impressao.pdf>>. Acesso em: 17 de julho de 2021.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2005**: Ano base 2004. Brasília, 2005a. ISS 0101-6636

BRASIL. Senado Federal. **Antes do SUS, saúde era para poucos**. Brasília, 2014. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/saude/contexto/antes-do-sus-saude-era-para-poucos>>. Acesso em: 18 de agosto de 2021.

BEN 2021. **Relatório Síntese 2021 | Ano base 2020**. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf> Acesso em 02 de novembro de 2021.

CARDOSO, L. A. **Estudo do método construtivo de Wood Framing para construção de habitações de interesse social**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CLIMATE ACTION TRACKER. **Countries**. Disponível em <<https://climateactiontracker.org/countries/>> Acesso em 15 de outubro de 2021.

CORRÊA, L. R. **Sustentabilidade na construção civil**. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Dissertação de mestrado (Programa de

Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

HARTLEY, J. F. **Case studies in organizational research**. In: CASSELL, Catherine & SYMON, Gillian (Ed.). *Qualitative methods in organizational research: a practical guide*. London: Sage, 1994.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp

IPCC, 2018: **Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. hou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

IPCC, 2021: **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 14040: Environmental management — life cycle assessment — principles and framework**. Geneva, Switzerland, 1997.

JR, T. S. **Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: Um estudo de caso de habitação de interesse social no Paraná.** Artigo apresentado no XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro – RJ, out. de 2008.

JR, T. S. **Pegada de carbono na construção civil: Estudo de caso que evitou a emissão de mais de 62.000ton CO₂ e reestruturou o setor de madeira nativa certificada no Rio de Janeiro.** Artigo apresentado no Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. São Paulo - SP, dez. de 2016.

MARTINS, G. A. **Estudo de caso: uma reflexão sobre a aplicabilidade em pesquisas no Brasil.** Revista de Contabilidade e Organizações, v. 2, n. 2, Jan./Abr.

MOREIRA, V. S. *et al.* **“Minha Casa, Minha Vida” em números.** João Pessoa, 2017.
Disponível em: <<https://www.ufpb.br/ebap/contents/documentos/0594-613-minha-casa.pdf>>.
Acesso em: 14 de agosto de 2021.

NUNES, V. Q. G. **Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2011.

SEEG 2019. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil, 1970 - 2018.** Observatório do Clima. Nov/2019

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F; LAMBERTS, R. **Estudos comparativos sobre consumo energético no ciclo de vida de edificações residenciais do Brasil, Austrália e Suécia.** In X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC 2004. São Paulo, SP. Julho de 2004.

TAYLOR, F.W. **Princípios de administração científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 1990.

TECVERDE. 2021. Disponível em:

<<https://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Portf%C3%B3lio-Site-Tecverde.pdf>>. Acesso em: 16 de agosto de 2021.

TECVERDE ENGENHARIA LTDA. **DATec N° 20-D: Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada – Tecverde (tipo light Wood Framing)**. São Paulo, 2020.

UM SÓ PLANETA. **Temperatura Global**. 2021. Disponível em:

<<https://umsoplaneta.globo.com/indicadores/temperatura-global/>> acesso em 02 de novembro de 2021.

UNITED NATIONS – UN. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York, 2015. Disponível em:

<<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>>. Acesso em: 17 de julho de 2021.

WRI BRASIL. **4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor**. 2020. Disponível em

<<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2020/02/quatro-graficos-explicam-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>>. Acesso em 30 de outubro de 2021.

WRI. **World Greenhouse Gas Emissions: 2018**. 2021. Disponível em

<<https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2018>>. Acesso em 19 de outubro de 2021.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3 ed., Porto Alegre: Bookman, 2005.

ANEXO 1 - Quantitativo de materiais - Paredes de Concreto

DESCRIÇÃO	UNIDADE	QUANTIDADE
INFRAESTRUTURA		
Arrasamento estacas fundacao	un	58,00
Aço ca 50 10,00 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas	kg	375,00
Aço ca 60 5,0 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	114,00
Concreto usinado fck 20 mpa bombeado, lançado e adensado	m3	26,00
Aço ca 50 8,00 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	110,00
Aço ca 50 6,3 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	285,00
Aço ca 50 8,00 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	65,00
Aço ca 50 10,00 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas	kg	700,00
Aço ca 50 12,50 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas	kg	88,00
Forma plana para estruturas, em compensado resinado de 12mm, 05 usos	m2	2,58
Concreto usinado fck 25 mpa bombeado, lançado e adensado	m3	16,00
Lastro de brita 1	m2	210,00
Concreto usinado fck 30 mpa bombeado, lançado e adensado	m3	21,00
Malha soldada aço ca 60 - q92 - (2,45x6,0m)	m2	231,00
SUPRAESTRUTURA		
Manta isolamento laje cobertura	m2	16,00
Concreto usinado fck 25 mpa bombeado auto adensável	m3	265,00
Malha soldada aço ca 60 - q92 - (2,45x6,0m)	m2	3,09
Aço ca 60 5,0 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	37,00
Aço ca 50 6,3 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	450,00
Aço ca 50 8,00 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	352,00
Aço ca 50 10,00 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas	kg	730,00
Aço ca 50 12,50 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas	kg	685,00
Aço ca 50 16 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	35,00
Concreto usinado fck 25 mpa bombeado auto adensável	m3	10,00
Malha soldada aço ca 60 - q92 - (2,45x6,0m)	m2	104,00
Aço ca 50 10,00 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas	kg	100,00
Aço ca 50 6,3 mm, inclusive corte, dobragem, montagem, colocação de ferragens nas formas para superestruturas e	kg	5,00
Shaft modular	m2	21,00
ESQUADRIAS		
Janela de aluminio anodizado fosco 0,60x0,60, maxi-ar 1 folha, linha módulo prático, vidro incolor 4mm	m³	0,06
Anela de aluminio anodizado fosco 1,50x1,00 m correr 2 folha, linha módulo prático, vidro incolor 4mm	m³	0,48
Janela aluminio maxi-ar 90x100 cm vidro incolor temperado 4 mm bandeira inferior fixa c/ delimitador de abertura	m³	0,03
Porta de aluminio anodizado fosco 1,5x2,2 correr 2 folha, linha módulo prático, vidro incolor 4mm	m³	2,11
Porta madeira interna 80 x 210	m³	15,79
Porta madeira entrada 80/90	m³	6,05
COBERTURA		
Estrutura de madeira para telha ondulada de fibrocimento, sob laje	m3	28,00
Manta térmica alumínio e clarabóia em fibrocimento	m3	1,40
Cobert. Telha fibrocimento 6mm-telha 3,05m	m3	0,84
REVESTIMENTOS		
Rejunte tipo i	m3	3,60
Azulejo assentado com argamassa colante aci, juntas a prumo	m3	3,60
Forro de pvc	m2	108,00
Regularização interna com massa niveladora para tetos e paredes	m2	0,03
Regularização de paredes externas com massa niveladora cimentícia	m2	7,00
Regularização de base p/revest. De piso com arg. Auto nivelante com manta acústica	m2	8,40
Piso cerâmico esmaltado assentado com argamassa colante	m3	7,60
Piso cerâmico esmaltado antiderrapante assentado com argamassa colante	m3	0,80
Rodapé de cerâmica de 7cm	m3	6,46
PINTURA		
Emassamento de paredes e tetos c/massa corrida pva 2 demãos	m³	2,53
Selamento de paredes e tetos	m³	0,63
Textura lisa	l	634,00
Pintura interna com tinta acrílica fosca (2 demãos)	l	5,06
Textura hidropelente externa (1 demão)	l	35,00
Pintura externa com tinta acrílica fosca (2 demãos)	l	70,00

ANEXO 2 - Quantitativo de materiais - *Light Wood Framing*

DESCRIÇÃO	UNIDADE	QUANTIDADE
INFRAESTRUTURA		
Calçada de concreto	m ³	8,65
Radier de Concreto Armado	m ³	78,00
Concretagem	m ³	39,00
SUPRAESTRUTURA		
Chapeamento camada de gesso (paredes) - 1ª Camada	m ³	41,84
Compensado tratado 18,3mm	m ³	2,26
Gesso acartonado para forro	m ³	84,14
Lã de rocha 50mm (geminação)	m ³	5,92
OSB 18,3mm	m ³	7,85
Pinus Estrutural 38x140	m ³	24,39
Pinus Estrutural 38x90	m ³	13,11
Pinus Estrutural 45x190	m ³	16,23
Pinus Estrutural 45x90	m ³	6,55
Parafusos e pregos	kg	62,06
ESQUADRIAS		
Janela Alum. Maxim-ar 80x80cm	m ³	0,14
Janela s/ Veneziana 120x120cm QUARTO	m ³	0,46
Janela s/ Veneziana 120x120cm SALA	m ³	0,23
Janela s/ Veneziana 2 Flh c/ Fx Inf. 100x200cm	m ³	0,32
Porta pronta 165x220cm externa alumínio com 2 Flh laterais	m ³	0,15
Porta semi-oca de entrada de madeira 90x210mm (apto)	m ³	6,05
Porta semi-oca interna de madeira 70x210mm	m ³	9,41
Porta semi-oca interna de madeira RU 60x210mm (BWC)	m ³	4,03
COBERTURA		
Forro de PVC p/ beiral	m ²	49,65
Parafusos e pregos	kg	0,50
OSB 9,5mm p/ telhado	m ³	2,53
Ripas, contra-ripas, caibros, contra-caibros , reforços e contraventamento	m ³	3,99
Telha cerâmica convencional	m ³	1,60
REVESTIMENTOS		
Concreto p/ contrapiso (c/ bomba)	m ³	25,60
Parafusos e pregos	kg	31,30
Massa p/ tratamento de juntas de gesso - Forro	kg	14,93
Chapeamento forro de gesso	m ³	30,08
Revestimento cerâmico parede	m ³	0,77
Revestimento cerâmico parede - Banheiros	m ³	2,53
Revestimento cerâmico parede - Cozinha	m ³	1,30
Piso cerâmico PEI4 base seca	m ³	1,14
Piso cerâmico PEI4 base seca - Banheiros	m ³	0,38
Piso cerâmico PEI4 base seca - Cozinha	m ³	0,88
Massa cimentícia para canto e parafusos	m ³	0,73
PINTURA		
Textura externa elastomérica	kg	1.683,24
Pintura interna	l	263,46
Selador acrílico p/ pintura interna	l	368,84
Selador acrílico p/ textura	l	110,18
Textura externa elastomérica e selador	l	38,26

APÊNDICE 1 - Quantitativos levantados

A.1. QUANTITATIVOS LEVANTADOS (un.)

1. Paredes de Concreto

Materiais	Unidade	TOTAL	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura
Aço e ferro	kg	4.631,37	2.078,88	2.552,49				
Alumínio	m³	2,68			2,68			
Argamassa	m³	13,16					10,63	2,53
Cerâmica revestimento	m³	3,60					3,60	
Cerâmica vermelha	m³	0,00						
Concreto armado	m³	338,00	63,00	275,00				
Concreto simples	m³	0,00						
Fibra de vidro	m³	0,00						
Fibrocimento	m³	2,24				2,24		
Gesso	m³	0,00						
Lã mineral	m³	16,00		16,00				
Madeira (simples)	m³	30,58	2,58			28,00		
Madeira (MDF e OSB)	m³	0,00						
Madeira (porta)	m³	21,84			21,84			
Plásticos	m²	108,00					108,00	
Tinta (interiores)	l	639,06						639,06
Tinta (exteriores)	l	105,00						105,00

2. Wood Framing

Materiais	Unidade	TOTAL	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura
Aço e ferro	kg	93,86		62,06		0,50	31,30	
Alumínio	m³	1,30			1,30			
Argamassa	m³	0,73					0,73	
Cerâmica revestimento	m³	7,00					7,00	
Cerâmica vermelha	m³	1,60				1,60		
Concreto armado	m³	0,00						
Concreto simples	m³	151,25	125,65				25,60	
Fibra de vidro	m³	0,00						
Fibrocimento	m³	0,00						
Gesso	m³	156,05		125,97			30,08	
Lã mineral	m³	0,00						
Madeira (simples)	m³	3,99				3,99		
Madeira (MDF e OSB)	m³	72,91		70,39		2,53		
Madeira (porta)	m³	19,49			19,49			
Plásticos	m²	49,65				49,65		
Tinta (interiores)	l	632,30						632,30
Tinta (exteriores)	l	148,43						148,43

APÊNDICE 2 - Quantitativos levantados + reposição

A.2. QUANTITATIVOS + REPOSIÇÃO + DESPERDÍCIO (un.)

1. Paredes de Concreto

Materiais	Unidade	TOTAL	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura
Aço e ferro	kg	12.875,21	5.779,29	7.095,92				
Alumínio	m³	2,68			2,68			
Argamassa	m³	18,42					14,88	3,54
Cerâmica revestimento	m³	6,96					6,96	
Cerâmica vermelha	m³	0,00						
Concreto armado	m³	338,00	63,00	275,00				
Concreto simples	m³	0,00						
Fibra de vidro	m³	0,00						
Fibrocimento	m³	3,08				3,08		
Gesso	m³	0,00						
Lã mineral	m³	16,00		16,00				
Madeira (simples)	m³	35,17	2,97			32,20		
Madeira (MDF e OSB)	m³	0,00						
Madeira (porta)	m³	21,84			21,84			
Plásticos	m²	119,88					119,88	
Tinta (interiores)	l	3.064,61						3.064,61
Tinta (exteriores)	l	787,29						787,29

2. Wood Framing

Materiais	Unidade	TOTAL	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura
Aço e ferro	kg	260,93		172,52		1,39	87,01	
Alumínio	m³	1,30			1,30			
Argamassa	m³	1,02					1,02	
Cerâmica revestimento	m³	13,52					13,52	
Cerâmica vermelha	m³	3,08				3,08		
Concreto armado	m³	0,00						
Concreto simples	m³	166,37	138,21				28,16	
Fibra de vidro	m³	0,00						
Fibrocimento	m³	0,00						
Gesso	m³	156,05		125,97			30,08	
Lã mineral	m³	0,00						
Madeira (simples)	m³	4,59				4,59		
Madeira (MDF e OSB)	m³	83,85		80,94		2,90		
Madeira (porta)	m³	19,49			19,49			
Plásticos	m²	55,11				55,11		
Tinta (interiores)	l	3.032,22						3.032,22
Tinta (exteriores)	l	1.112,93						1.112,93

APÊNDICE 3 - Quantitativos em toneladas

A.3. QUANTITATIVOS + REPOSIÇÃO + DESPERDÍCIO (ton)

1. Paredes de Concreto

Materiais	Unidade	TOTAL	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura
Aço e ferro	ton	12,88	5,78	7,10				
Alumínio	ton	7,24			7,24			
Argamassa	ton	34,26					27,68	6,59
Cerâmica revestimento	ton	13,91					13,91	
Cerâmica vermelha	ton	0,00						
Concreto armado	ton	811,20	151,20	660,00				
Concreto simples	ton	0,00						
Fibra de vidro	ton	0,00						
Fibrocimento	ton	5,91				5,91		
Gesso	ton	0,00						
Lã mineral	ton	1,76		1,76				
Madeira (simples)	ton	21,10	1,78			19,32		
Madeira (MDF e OSB)	ton	0,00						
Madeira (porta)	ton	14,20			14,20			
Plásticos	ton	0,17					0,17	
Tinta (interiores)	ton	3,98						3,98
Tinta (exteriores)	ton	1,02						1,02

2. Wood Framing

Materiais	Unidade	TOTAL	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura
Aço e ferro	ton	0,26		0,17		0,00	0,09	
Alumínio	ton	3,51			3,51			
Argamassa	ton	1,90					1,90	
Cerâmica revestimento	ton	27,04					27,04	
Cerâmica vermelha	ton	5,86				5,86		
Concreto armado	ton	0,00						
Concreto simples	ton	382,66	317,89				64,77	
Fibra de vidro	ton	0,00						
Fibrocimento	ton	0,00						
Gesso	ton	124,84		100,78			24,06	
Lã mineral	ton	0,00						
Madeira (simples)	ton	2,75				2,75		
Madeira (MDF e OSB)	ton	83,85		80,94		2,90		
Madeira (porta)	ton	12,67			12,67			
Plásticos	ton	0,08				0,08		
Tinta (interiores)	ton	3,94						3,94
Tinta (exteriores)	ton	1,45						1,45

APÊNDICE 4 - Energia embutida

B. ENERGIA EMBUTIDA (GJ)

1. Paredes de Concreto		45,18 m²								
Materiais	Unidade	TOTAL	%	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura	
Aço e ferro	GJ	386,26	9,0%	173,38	212,88					
Alumínio	GJ	710,58	16,6%			710,58				
Argamassa	GJ	71,96	1,7%					58,12	13,84	
Cerâmica revestimento	GJ	70,94	1,7%					70,94		
Cerâmica vermelha	GJ	0,00	0,0%							
Concreto armado	GJ	2.514,72	58,9%	468,72	2.046,00					
Concreto simples	GJ	0,00	0,0%							
Fibra de vidro	GJ	0,00	0,0%							
Fibrocimento	GJ	35,48	0,8%				35,48			
Gesso	GJ	0,00	0,0%							
Lã mineral	GJ	33,44	0,8%		33,44					
Madeira (simples)	GJ	73,85	1,7%	6,23			67,62			
Madeira (MDF e OSB)	GJ	0,00	0,0%							
Madeira (porta)	GJ	49,69	1,2%			49,69				
Plásticos	GJ	16,51	0,4%					16,51		
Tinta (interiores)	GJ	243,02	5,7%						243,02	
Tinta (exteriores)	GJ	62,43	1,5%						62,43	
TOTAL	GJ	4.268,88		648,33	2.292,32	760,26	103,10	145,58	319,29	
TOTAL por m²	GJ/m²	5,91		0,90	3,17	1,05	0,14	0,20	0,44	
%				15,2%	53,7%	17,8%	2,4%	3,4%	7,5%	

2. Wood Framing		42,7 m²								
Materiais	Unidade	TOTAL	%	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura	
Aço e ferro	GJ	7,83	0,3%		5,18		0,04	2,61		
Alumínio	GJ	344,68	13,1%			344,68				
Argamassa	GJ	3,98	0,2%					3,98		
Cerâmica revestimento	GJ	137,89	5,2%					137,89		
Cerâmica vermelha	GJ	31,62	1,2%				31,62			
Concreto armado	GJ	0,00	0,0%							
Concreto simples	GJ	459,19	17,5%	381,47				77,72		
Fibra de vidro	GJ	0,00	0,0%							
Fibrocimento	GJ	0,00	0,0%							
Gesso	GJ	499,38	19,0%		403,12			96,26		
Lã mineral	GJ	0,00	0,0%							
Madeira (simples)	GJ	9,63	0,4%				9,63			
Madeira (MDF e OSB)	GJ	754,64	28,7%		728,50		26,14			
Madeira (porta)	GJ	44,34	1,7%			44,34				
Plásticos	GJ	7,59	0,3%				7,59			
Tinta (interiores)	GJ	240,45	9,1%						240,45	
Tinta (exteriores)	GJ	88,26	3,4%						88,26	
TOTAL	GJ	2.629,47		381,47	1.136,79	389,02	75,02	318,47	328,71	
TOTAL por m²	GJ/m²	3,85		0,56	1,66	0,57	0,11	0,47	0,48	
%				14,5%	43,2%	14,8%	2,9%	12,1%	12,5%	

APÊNDICE 5 - Emissão de CO₂

C. EMISSÃO DE CO2 (t CO2)

1. Paredes de Concreto		45,18 m²								
Materiais	Unidade	TOTAL	%	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura	
Aço e ferro	t CO2	28,93	13,0%	12,98	15,94					
Alumínio	t CO2	42,46	19,0%			42,46				
Argamassa	t CO2	5,51	2,5%					4,45	1,06	
Cerâmica revestimento	t CO2	3,67	1,6%					3,67		
Cerâmica vermelha	t CO2	0,00	0,0%							
Concreto armado	t CO2	108,15	48,5%	20,16	87,99					
Concreto simples	t CO2	0,00	0,0%							
Fibra de vidro	t CO2	0,00	0,0%							
Fibrocimento	t CO2	2,51	1,1%				2,51			
Gesso	t CO2	0,00	0,0%							
Lã mineral	t CO2	1,79	0,8%		1,79					
Madeira (simples)	t CO2	3,96	1,8%	0,33			3,63			
Madeira (MDF e OSB)	t CO2	0,00	0,0%							
Madeira (porta)	t CO2	2,67	1,2%			2,67				
Plásticos	t CO2	0,87	0,4%					0,87		
Tinta (interiores)	t CO2	17,89	8,0%						17,89	
Tinta (exteriores)	t CO2	4,60	2,1%						4,60	
TOTAL	t CO2	223,02		33,48	105,73	45,13	6,14	8,99	23,55	
TOTAL por m²	t CO2/m²	0,31		0,05	0,15	0,06	0,01	0,01	0,03	
%				15,0%	47,4%	20,2%	2,8%	4,0%	10,6%	

2. Wood Framing		42,7 m²								
Materiais	Unidade	TOTAL	%	Infraestrutura	Supraestrutura	Esquadrias	Cobertura	Revestimentos	Pintura	
Aço e ferro	t CO2	0,59	0,3%		0,39		0,00	0,20		
Alumínio	t CO2	20,60	11,7%			20,60				
Argamassa	t CO2	0,31	0,2%					0,31		
Cerâmica revestimento	t CO2	7,13	4,1%					7,13		
Cerâmica vermelha	t CO2	1,33	0,8%				1,33			
Concreto armado	t CO2	0,00	0,0%							
Concreto simples	t CO2	51,02	29,0%	42,38				8,63		
Fibra de vidro	t CO2	0,00	0,0%							
Fibrocimento	t CO2	0,00	0,0%							
Gesso	t CO2	26,79	15,2%		21,63			5,16		
Lã mineral	t CO2	0,00	0,0%							
Madeira (simples)	t CO2	0,52	0,3%				0,52			
Madeira (MDF e OSB)	t CO2	40,49	23,0%		39,08		1,40			
Madeira (porta)	t CO2	2,38	1,4%			2,38				
Plásticos	t CO2	0,40	0,2%				0,40			
Tinta (interiores)	t CO2	17,70	10,1%						17,70	
Tinta (exteriores)	t CO2	6,50	3,7%						6,50	
TOTAL	t CO2	175,74		42,38	61,10	22,98	3,65	21,43	24,20	
TOTAL por m²	t CO2/m²	0,26		0,06	0,09	0,03	0,01	0,03	0,04	
%				24,1%	34,8%	13,1%	2,1%	12,2%	13,8%	

APÊNDICE 6 - Fatores de Multiplicação

FATORES DE MULTIPLICAÇÃO UTILIZADOS

Materiais	Unidade	Fator de conversão para kg	Fator de Desperdício	Fator de Reposição
Aço e ferro	kg	1,00	0,00%	2,78
Alumínio	m ³	2.700,00	0,00%	1,00
Argamassa	m ³	1.860,00	40,00%	1,00
Cerâmica revestimento	m ³	2.000,00	15,00%	1,68
Cerâmica vermelha	m ³	1.900,00	15,00%	1,68
Concreto armado	m ³	2.400,00	0,00%	1,00
Concreto simples	m ³	2.300,00	10,00%	1,00
Fibra de vidro ¹	m ³	32,00	0,00%	-
Fibrocimento	m ³	1.920,00	10,00%	1,25
Gesso ¹	m ³	800,00	0,00%	-
Lã mineral ¹	m ³	110,00	0,00%	-
Madeira (simples) ¹	m ³	600,00	15,00%	-
Madeira (MDF) ¹	m ³	1.000,00	15,00%	1,00
Madeira (porta) ¹	m ³	650,00	0,00%	1,00
Plásticos	m ²	1,45	0,00%	1,11
Tinta (interiores)	l	1,30	15,00%	4,17
Tinta (exteriores)	l	1,30	15,00%	6,52

¹ Dos autores, a partir de BEN

APÊNDICE 7 - Fatores de Emissão

FATORES DE EMISSÃO UTILIZADOS

Materiais	Energia Embutida (GJ/t)	Emissão de CO2 energético (t CO2/t)	Emissão de CO2 não energético (t CO2/t)	Emissão de CO2 total (t CO2/t)
Aço e ferro	30,00	2,247		2,25
Alumínio	98,20	4,268	1,60	5,87
Argamassa	2,10	0,161		0,16
Cerâmica revestimento	5,10	0,264		0,26
Cerâmica vermelha	5,40	0,227		0,23
Concreto armado	3,10	0,088	0,05	0,13
Concreto simples	1,20	0,088	0,05	0,13
Fibra de vidro ¹	24,00	1,288		1,29
Fibrocimento	6,00	0,425		0,42
Gesso ¹	4,00	0,215		0,21
Lã mineral ¹	19,00	1,019		1,02
Madeira (simples) ¹	3,50	0,188		0,19
Madeira (MDF) ¹	9,00	0,483		0,48
Madeira (porta) ¹	3,50	0,188		0,19
Plásticos	95,00	4,992		4,99
Tinta (interiores)	61,00	4,491		4,49
Tinta (exteriores)	61,00	4,491		4,49

¹ Dos autores, a partir de BEN