

**BOLETIM TÉCNICO
IBRACON/ABECE/ABCIC**

**Quantificação das emissões
de CO₂ incorporadas em
materiais cimentícios e
estruturas de concreto**

**COMITÊ TÉCNICO CT 101
IBRACON/ABECE/ABCIC –
Sustentabilidade do Concreto**

Editores:

Katia Regina Garcia Punhagui
Carlos José Massucato

Autora:

Fernanda Belizario Silva



**BOLETIM TÉCNICO
IBRACON/ABECE/ABCIC**

**Quantificação das emissões
de CO₂ incorporadas em
materiais cimentícios e
estruturas de concreto**

**COMITÊ TÉCNICO CT 101
IBRACON/ABECE/ABCIC –
Sustentabilidade do Concreto**

Editores:

Katia Regina Garcia Punhagui
Carlos José Massucato

Autora:

Fernanda Belizario Silva



IBRACON

PATROCÍNIO



BOLETIM TÉCNICO IBRACON/ABECE/ABCIC

QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ INCORPORADAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS E ESTRUTURAS DE CONCRETO

COMITÊ TÉCNICO CT 101 IBRACON/ABECE/ABCIC – Sustentabilidade do Concreto

Editores:

Katia Regina Garcia Punhagui
Carlos José Massucato

Autora:

Fernanda Belizario Silva

Com contribuições de:

Alex Neves Junior, Alvaro Barbosa, Angel Ibañez, Claudio Sbrighi, Diana Nascimento Lins, Edna Possan, Emilio Takagi, Ercio Thomaz, Hugo S. Armelin, Íria Lícia Oliva Doniak, Jairo José de Oliveira Andrade, Jorge Batlouni Neto, Jorge Luiz Christofolli, José Marques Filho, Luiz Aurélio Fortes da Silva, Marcio Joaquim Estefano de Oliveira, Matheus Oliveira de Azevedo, Mauricio Bianchini, Patricia Falcão Bauer, Paulo Helene, Ricardo Couceiro Bento, Roberto Dakuzaku, Rodrigo Nurnberg, Seiiti Suzuki, Vanderley John.

CT 304 – Comitê Técnico IBRACON/ABCIC de
Pré-Fabricados de Concreto

1ª Edição

IBRACON

Instituto Brasileiro do Concreto

Fundado em 23 de junho de 1972

“Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento
do Concreto e da Construção Civil

São Paulo – 2024

BOLETIM TÉCNICO IBRACON/ABECE/ABCIC:

Quantificação das emissões de CO₂ incorporadas em materiais cimentícios e estruturas de concreto

COMITÊ TÉCNICO CT 101 – Sustentabilidade do Concreto

Editores: Katia Regina Garcia Punhagui, Carlos José Massucato

Autora: Fernanda Belizario Silva

Com contribuições de: Alex Neves Junior, Alvaro Barbosa, Angel Ibañez, Claudio Sbrighi, Diana Nascimento Lins, Edna Possan, Emilio Takagi, Ercio Thomaz, Hugo S. Armelin, Íria Lícia Oliva Doniak, Jairo José de Oliveira Andrade, Jorge Batlouni Neto, Jorge Luiz Christofolli, José Marques Filho, Luiz Aurélio Fortes da Silva, Marcio Joaquim Estefano de Oliveira, Matheus Oliveira de Azevedo, Mauricio Bianchini, Patricia Falcão Bauer, Paulo Helene, Ricardo Couceiro Bento, Roberto Dakuzaku, Rodrigo Nurnberg, Seiiti Suzuki, Vanderley John.

CT 304 – Comitê Técnico IBRACON/ABCIC de Pré-Fabricados de Concreto

Primeira Edição. São Paulo.

Ed. IBRACON, 2024.

86 p. 21 cm × 29,7 cm

ISBN 978-65-89675-26-6

Copyright© 2024 IBRACON. Todos os direitos reservados. Este livro e suas partes não podem ser reproduzidos nem copiados, em nenhuma forma de impressão mecânica, eletrônica ou qualquer outra, sem o consentimento por escrito dos editores. Esta é a primeira edição.

Editoração Eletrônica e Diagramação: Arte Interativa
www.arteinterativa.com.br

Imagem de capa: AdobeStock_143391927 (recorte).

As informações contidas neste livro foram obtidas pelo autor e pelo IBRACON, de fontes consideradas idôneas. No entanto, nem os autores, nem os revisores ou o IBRACON devem ser responsabilizados por quaisquer erros, omissões ou danos decorrentes do uso indevido destas informações. Este livro é publicado com o objetivo de fornecer informação técnico-científica, mas não de prestar serviços de engenharia ou outros serviços profissionais. Se tais serviços forem necessários, um profissional competente deve ser contratado.



Missão

Criar, divulgar e defender o correto conhecimento sobre materiais, projeto, construção, uso e manutenção de obras de concreto, desenvolvendo o seu mercado, articulando seus agentes e agindo em benefício dos consumidores e da sociedade, em harmonia com o meio ambiente.



Missão

- Promover a valorização do engenheiro de estruturas;
- Estimular o intercâmbio de experiências profissionais (técnicas, administrativas e empresariais);
- Canalizar as manifestações e articulações do setor perante os agentes institucionais;
- Criar mecanismos de desenvolvimento e fortalecimento das empresas do setor;
- Estabelecer padrões mínimos reconhecidos de desempenho dos profissionais do setor.



Missão

A Abcic (Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto), representa a indústria de pré-fabricados (estruturas, fachadas e fundações) no Brasil e tem por objetivo principal o desenvolvimento e a difusão do sistema construtivo e da industrialização da construção.

Diretoria
Biênio 2023/2025

Diretor Presidente
Julio Timerman

Diretor 1º Vice-presidente/1º Tesoureiro
Paulo Helene

Assessores da Presidência

Enio José Pazini Figueiredo, Íria Licia Oliva Doniak,
Mario William Esper, Selmo Chapira Kuperman e Wagner Roberto Lopes

Diretor 2º Vice-presidente

Carlos José Massucato

Diretor 1º Secretário

Claudio Sbrighi Neto

Diretor 2º Secretário

José Vanderlei de Abreu

Diretor 1º Tesoureiro

Nelson Covas

Diretora 2ª Tesoureira

Paula Lacerda Baillot

Diretor Técnico

Ércio Thomaz

Diretor de Relações Institucionais

Maurício Bianchini

Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento

Leandro Moura Trautwein

Diretor de Publicações

Marco Antônio Cárnio

Diretor de Eventos

Túlio Nogueira Bittencourt

Diretora de Cursos

Jessika Mariana Pacheco Misko

Diretor de Certificação de Pessoal

César Henrique Sato Daher

Diretor de Marketing

Alexandre Amado Britez

Diretora de Atividades Estudantis

Jéssica Andrade Dantas

Conselho Diretor

Biênio 2023/2025

Conselheiros Individuais

Alio Ernesto Kimura	Guilherme Aris Parsekian
Arnaldo Forti Battagin	Inês Laranjeira da Silva Battagin
Bernardo Fonseca Tutikian	Iria Lícia Oliva Doniak
Carlos José Massucato	Nelson Covas
César Henrique Sato Daher	Rafael Timerman
Claudio Sbrighi Neto	Thomas Garcia Carmona
Enio José Pazini Figueiredo	

Conselheiros Ex-presidentes

Eduardo Antonio Serrano
José Marques Filho
Júlio Timerman
Paulo Roberto do Lago Helene
Ronaldo Tartuce
Rubens Machado Bittencourt
Selmo Chapira Kuperman
Simão Prizskulnik
Túlio Nogueira Bittencourt

Conselheiros Corporativos

ABCIC – Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto – Íria Lícia Oliva Doniak
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland – Paulo Camillo Vargas Penna
ABECE – Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – Luiz Aurelio F. da Silva
ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Concretagem – Wagner Roberto Lopes
EPUSP – Escola Politécnica da USP – Túlio Nogueira Bittencourt
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Fabiano Ferreira Chotoli
MC-BAUCHEMIE – MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda. – Jaques Pinto
PhD – PhD Engenharia Ltda. – Douglas de Andreza Couto
TQS – TQS Informática Ltda. – Nelson Covas
VOTORANTIM – Votorantim Cimentos S.A. – Hugo S. Armelin

ABECE

Diretoria

Biênio 2022/2024

Presidente

Luiz Aurélio Fortes da Silva

Vice-presidente de Relacionamento

Ricardo Borges Kerr

Vice-presidente de Marketing

Tiago Garcia Carmona

Vice-presidente de Tecnologia e Qualidade

Leonardo Braga Passos

Diretor Administrativo Financeiro

Roberto Dias Leme

Diretor de Relacionamento

Túlio Nogueira Bittencourt

Diretor de Relacionamento

José Martins Laginha Neto

Diretor de Marketing

Cândido José F. de Magalhães

Diretor de Marketing

Jorge Nakajima

Diretor de Tecnologia e Qualidade

Joaquim Eduardo Mota

Diretor de Tecnologia e Qualidade

Claudio Adler

Diretor-Adjunto de Tecnologia e Qualidade

Fernando Lopes de Moraes

Diretora de Normas Técnicas

Suely Bacchereti Bueno

Diretor-adjunto de Normas Técnica

Alio Ernesto Kimura

Diretor-adjunto de Normas Técnica

Gustavo Licht Fortes

Diretor-adjunto de Normas Técnica

Gabriel Louzado Mazzo

Diretor de Estruturas Metálicas

Tomás Vieira de Lima

Diretor de Pontes e Estruturas

João Luis Casagrande

Diretor-Adjunto de Pontes e Estruturas

Pedro Henrique C. de Lyra

Diretor de Pré-Moldados

Luis Otávio Baggio Livi

Diretor de Pré-Moldados

Carlos Eduardo Emrich Melo

Conselheiro Deliberativo

2020 a 2024

Augusto Guimarães Pedreira de Freitas

Eduardo Barros Millen (*in memoriam*)

Francisco Paulo Graziano

Hélio Pereira Chumbinho

João Alberto de Abreu Vendramini

José Augusto De Ávila

Júlio Timerman

Natan Jacobsohn Levental

Nelson Covas

Virgílio Augusto Ramos (*in memoriam*)

Conselheiro Deliberativo

2022-2026

Enio Canavello Barbosa

Flávio Correia D'Alambert

Jefferson Dias de Souza Junior

João Luis Casagrande

Marcelo Rozenberg

Marcos de Mello Velletri

Marcos Monteiro

Ricardo Leopoldo e Silva França

Valdir Silva da Cruz

Diretoria

Gestão 2022/2024

Presidente Executiva

Íria Lícia Oliva Doniak

Diretor Administrativo Financeiro

Nivaldo de Loyola Richter

Diretor Técnico

Luis André Tomazoni

Diretor de Marketing

Wilson Claro

Diretor de Desenvolvimento

Ronaldo Franco

Conselho Estratégico

Presidente

Felipe Cassol

Vice-presidente

João Carlos Leonardi

Conselheiros

Mauro Cesar Falchi, Wellington Pedro
Morais Santos, Bruno Simões Dias,
Luiz Otávio Baggio Livi, Ricardo
Panham, Claudio Gomes de Castilho,
Gilmar Jaeger

Presidentes Honorários

Milton Moreira Filho, Paulo Sérgio
Cordeiro (in memorian), Carlos Alberto
Gennari, Aguinaldo Mafra Júnior,
André Pagliaro, José Antonio Tessari e
Guilherme Fiores Philippi

Conselho Fiscal

Rui Sérgio Guerra, Jaqueline Maria
Scimitz Milanesi, Fernando Gaion, Noé
Marcos Neto, Marcelo Lima Bandeira

O Comitê Técnico IBRACON/ABECE/ABCIC de Sustentabilidade do Concreto (CT-101) apresenta este Boletim Técnico, que tem como objetivo orientar como quantificar as emissões de CO₂ incorporadas ao longo do ciclo de vida de materiais cimentícios e estruturas de concreto. Trata-se de um primeiro passo para apoiar a gestão do desempenho ambiental de tais materiais e estruturas, visto que a quantificação das emissões é essencial para avaliar o efeito das diferentes estratégias de descarbonização adotadas pelos agentes do setor.

Este Boletim Técnico se baseia em guias e normas internacionais que adotam a abordagem do ciclo de vida para calcular indicadores de desempenho ambiental para materiais de construção, estruturas e edifícios. Com isso, buscou-se alinhar as orientações fornecidas às melhores práticas e aos padrões adotados internacionalmente, possibilitando inclusive a utilização de dados que se baseiam em tais normas como fonte de informação, como, por exemplo, dados constantes de Declarações Ambientais de Produto ou *Environmental Product Declarations* (EPDs), já elaboradas por alguns fabricantes brasileiros de materiais de construção.

Entretanto, tendo em vista a novidade deste assunto no Brasil, foram feitas simplificações para facilitar a adoção desta metodologia no contexto nacional. Por exemplo, o escopo mínimo recomendado abrange apenas as etapas iniciais do ciclo de vida das construções, que geralmente contribuem com a maior parte das emissões de CO₂ incorporadas totais em materiais cimentícios e estruturas de concreto. Da mesma forma, os exemplos citados ao longo do texto para ilustrar a aplicação das orientações fornecidas consideram situações simples e hipotéticas, com finalidade apenas didática.

Sendo assim, o presente Boletim Técnico não pretende esgotar o assunto, mas sim servir como uma introdução à quantificação das emissões de CO₂ de materiais cimentícios e estruturas de concreto, para que tais indicadores sejam calculados de forma harmonizada em âmbito nacional.

Fernanda Belizario Silva
Autora

Conteúdo

1. Introdução	1
2. Objetivo	1
3. Referências	2
4. Termos e Definições	3
5. Simbologia	5
5.1. LETRAS MINÚSCULAS	5
5.2. LETRAS MAIÚSCULAS	7
5.3. LETRAS GREGAS	8
5.4. SIGLAS.....	9
6. Abordagem do Ciclo de Vida	9
7. Definição do Escopo da Quantificação	12
7.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO DA QUANTIFICAÇÃO	12
7.2. UNIDADE FUNCIONAL OU DECLARADA	13
7.3. FRONTEIRA DA QUANTIFICAÇÃO	13
7.3.1. Etapas do ciclo de vida	14
7.3.2. Elementos construtivos	19
7.4. PERÍODO DE REFERÊNCIA.....	19
7.5. ESCOPO MÍNIMO.....	20
7.5.1. Etapas do ciclo de vida (materiais cimentícios)	20
7.5.2. Etapas do ciclo de vida (estruturas de concreto)	20
7.5.3. Elementos construtivos (estruturas de concreto)	21
8. Análise do Inventário	22
8.1. COLETA DE DADOS	22
8.1.1. Orientações gerais	22
8.1.2. Orientações para materiais cimentícios	25
8.1.2. Orientações para estruturas de concreto	25
8.2. CRITÉRIOS DE CORTE	26
8.3. PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO E ALOCAÇÃO	27

9. Cálculo dos indicadores	28
9.1. EMISSÃO DE CO ₂	28
9.1.1. Fatores de emissão de CO ₂	31
9.1.2. Remoções de CO ₂	33
9.1.3. Desdobramento por estágio do ciclo de vida	34
9.1.4. Consideração de incertezas.....	40
9.2. CONSUMO DE MATERIAL (ESTRUTURAS).....	41
10. Interpretação dos Resultados.....	42
11. Relatório.....	44
12. Exemplos.....	45
12.1. PRODUÇÃO DE CONCRETO DOSADO EM CENTRAL	45
12.1.1. Dados de entrada.....	45
12.1.2. Escopo	46
12.1.3. Mapeamento do sistema de produto.....	46
12.1.4. Elaboração do inventário.....	47
12.1.5. Cálculo da emissão de CO ₂	49
12.1.6. Interpretação dos resultados.....	54
12.2. PRODUÇÃO DE ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO	56
12.2.1. Dados de entrada.....	56
12.2.2. Escopo	57
12.2.3. Mapeamento do sistema de produto.....	57
12.2.4. Elaboração do inventário.....	58
12.2.5. Cálculo da emissão de CO ₂	62
12.2.6. Interpretação dos resultados.....	64
13. Conclusão	66
14. Bibliografia	66
15. Anexo A – Desdobramento da emissão de CO₂ nas etapas A1, A2 e A3	69
16. Anexo B – Procedimento alternativo para propagação de incertezas.....	71

Quantificação das Emissões de CO₂ Incorporadas em Materiais Cimentícios e Estruturas de Concreto

CT 101 Comitê IBRACON/ABECE/ABCIC –
Sustentabilidade do Concreto

1. Introdução

Os materiais cimentícios são fundamentais na construção civil. Entretanto, por serem consumidos em grandes quantidades, eles contribuem significativamente para diferentes impactos ambientais. No Brasil, estima-se que a produção de cimento e açoⁱ contribua com 17% das emissões de CO₂ⁱⁱ [1]. Sendo assim, os profissionais da cadeia de valor do cimento e do concreto têm um papel fundamental para mitigar as mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global [2].

Para descarbonizar a construção, o primeiro passo consiste em quantificar as emissões de CO₂ ao longo do seu ciclo de vida de forma confiável e harmonizada. Tal quantificação permite identificar os processos que mais contribuem para as emissões de CO₂, de modo a elencar prioridades para ações de mitigação de impactos ambientais. Também é possível comparar as emissões de CO₂ de alternativas que tenham desempenho equivalente [3], de modo que as decisões dos profissionais da construção também sejam embasadas em critérios ambientais.

A adoção de uma metodologia de quantificação única e harmonizada é essencial para permitir o desenvolvimento de valores de referência (benchmarks) de emissão de CO₂ para a construção, para que haja uma base de comparação em relação à qual resultados de materiais [4], estruturas ou edifícios específicos possam ser analisados [5,6]. Com base nesses benchmarks, é possível estabelecer metas realistas para redução da intensidade de carbono, de modo a incentivar a descarbonização contínua da construção [2,7].

2. Objetivo

O presente Boletim Técnico tem como objetivo apresentar **orientações para quantificar as emissões de CO₂ incorporadas em materiais cimentícios e estruturas de concreto** de forma harmonizada no contexto brasileiro. O boletim apresenta orientações gerais, aplicáveis a quaisquer produtos ou estruturas que utilizam materiais de base cimentícia e correlatos. Sendo assim, não são abordadas especificidades de cada tecnologia ou sistema construtivo.

ⁱ Inclusive aço utilizado para outras finalidades que não a construção.

ⁱⁱ Considerando apenas as emissões não relacionadas ao desmatamento.

Os exemplos citados ao longo do texto têm a finalidade de facilitar a compreensão dos conceitos apresentados e, portanto, são apenas ilustrativos e não exaustivos, não tendo a intenção de delimitar a aplicação dos conceitos e orientações deste documento somente aos casos citados.

Não integra o objetivo deste boletim a apresentação de medidas para reduzir as emissões de CO₂ de materiais ou estruturas de concreto. As orientações aqui apresentadas visam apenas ao cálculo das emissões incorporadas de CO₂, para subsidiar profissionais em sua tomada de decisão visando à promoção da sustentabilidade da construção, respeitando as especificidades de cada contexto.

3. Referências

Este Boletim Técnico foi elaborado tomando como base as seguintes referências principais:

- ABNT NBR 15575-1:2024. Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais.
- ABNT NBR ISO 14025:2015. Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III – Princípios e procedimentos.
- ABNT NBR ISO 14040:2009 Versão Corrigida 2014. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura.
- ABNT NBR ISO 14044:2009 Versão Corrigida 2014. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações.
- BELIZARIO-SILVA, F. Proposal of life cycle-based environmental performance indicators for decision-making in construction. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. <https://doi.org/10.11606/T.3.2022.tde-31102022-091740>.
- BELIZARIO-SILVA, F. et al. Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia. 1ª edição. São Paulo: SIDAC, 2022.
- EN 15804:2022. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products.
- EN 15978:2012. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. 2012.
- EN 16757:2023. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Product Category Rules for concrete and concrete elements.
- EN 16908:2022. Cement and building lime - Environmental product declarations - Product category rules complementary to EN 15804.
- ISO 15392:2019. Sustainability in buildings and civil engineering works – General principles.
- ISO 21678:2020. Sustainability in buildings and civil engineering works – Indicators and benchmarks – Principles, requirements and guidelines.
- ISO 21930:2017. Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services.
- Royal Institution of Chartered Surveyors. Whole life carbon assessment for the Built Environment. RICS Professional Statement, UK, 2ª Ed. 2023.
- The Institution of Structural Engineers. How to calculate embodied carbon. 2ª Ed. Londres: IStructE, 2022.

4. Termos e Definições

Este Boletim Técnico adota os seguintes termos e definições:

- **Alocação:** repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto (ABNT NBR ISO 14040).
- **Aspecto ambiental:** aspecto de obras, partes de obras, processos ou serviços relacionado ao ciclo de vida da construção que pode causar uma mudança no meio ambiente (ISO 15392).
- **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV):** compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT NBR ISO 14040).
- **Benchmarking:** processo de coletar, analisar e reportar dados de desempenho de edifícios ou outras construções consideradas comparáveis (ISO 21678).
- **Benchmark:** ponto de referência em relação ao qual comparações podem ser feitas (ISO 21678).
- **Carbonatação:** reação do dióxido de carbono (CO_2) com materiais cimentícios para formar carbonato de cálcio (CaCO_3) (EN 16757).
- **Carbono biogênico:** carbono derivado da biomassa (ISO 21930).
- **Ciclo de vida:** estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a extração de recursos naturais até a disposição final (ABNT NBR ISO 14040).
- **Co-produto:** qualquer um entre dois ou mais produtos procedentes do mesmo processo elementar ou sistema de produto (ABNT NBR ISO 14040).
- **Crítérios de corte:** especificação, em termos de fluxos de material ou energia ou do nível de significância ambiental associados a processos elementares ou a sistemas de produto, dos limites que definem a exclusão de dados de um estudo (ABNT NBR ISO 14040).
- **Dado específico:** dado representativo de um produto ou serviço de construção, disponibilizado por um fornecedor específico daquele produto ou serviço (ISO 21930).
- **Dado genérico:** dado geral utilizado na ausência de dados específicos (ISO 21930). No caso de materiais de construção, os dados genéricos devem refletir a variação de desempenho ambiental entre fabricantes daquele produto.
- **Dado primário:** dado quantificado de um processo elementar ou de uma atividade obtido por medição direta ou cálculo baseado em medição direta na fonte original de informação (ISO 21930).
- **Dado secundário:** dado de um processo elementar ou atividade obtido por medição indireta, cálculo ou coleta de dados não baseados na fonte original de informação (ISO 21930).
- **Declaração Ambiental de Produto (Declaração Ambiental de Tipo III, DAP, *Environmental Product Declaration, EPD*):** declaração ambiental que fornece dados ambientais quantificados, usando parâmetros pré-determinados e, onde relevante, informações ambientais adicionais (ABNT NBR ISO 14025).
- **Desempenho ambiental:** desempenho relacionado a impactos e/ou aspectos ambientais (ISO 15392).
- **Elemento construtivo:** parte principal de um edifício que cumpre função ou funções específica(s), independentemente de sua constituição, por

exemplo, pisos, estrutura reticulada, paredes externas (ISTRUCTE, ABNT NBR 15575-1).

- **Emissões de CO₂ incorporadas (*embodied carbon*):** emissões totais de gases de efeito estufa, associadas aos materiais, ao longo do ciclo de vida de um empreendimento (RICS).
- **Fluxo de referência:** medida das saídas de processos de um dado sistema de produto, requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional (ABNT NBR ISO 14044).
- **Fronteira do sistema:** conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto (ABNT NBR ISO 14040).
- **Indicador de desempenho ambiental:** indicador calculado a partir da compilação de um determinado conjunto de fluxos elementares (de entrada ou de saída), expresso em relação a uma unidade declarada ou funcional de um determinado sistema de produto, e que reflete um aspecto ambiental considerado prioritário para a cadeia de valor da construção civil.
- **Inventário do ciclo de vida (ICV):** quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT NBR ISO 14040).
- **Material processado:** material proveniente de outro sistema de produto, que já passou por algum tipo de processamento industrial.
- **Módulo de informação:** compilação de dados a serem usados como base para uma declaração ambiental de tipo III, cobrindo um processo ou uma combinação de processos que são parte do ciclo de vida de um produto (ABNT NBR ISO 14025).
- **Período de referência do estudo:** período ao longo do qual as características do objeto da avaliação dependentes do tempo são analisadas (EN 15978).
- **Processo:** conjunto de atividades inter-relacionadas ou interativas que transformam entradas em saídas (ABNT NBR ISO 14040).
- **Processo elementar:** menor elemento considerado na análise de inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados (ABNT NBR ISO 14040). A ISO 21930 adota a terminologia “processo unitário” (*unit process*) para a mesma definição.
- **Produto:** qualquer bem ou serviço (ABNT NBR ISO 14040).
- **Recurso material:** material extraído diretamente da natureza.
- **Resíduo sólido:** material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010).
- **Sistema de produto:** conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto (ABNT NBR ISO 14040).
- **Unidade declarada:** quantidade de um produto de construção para ser utilizada como unidade de referência em uma Declaração Ambiental de Produto, baseada em ACV. A unidade declarada é usada quando a função e o cenário de referência para o ciclo de vida completo do produto, no nível da edificação, não pode ser estabelecido (ISO 21930).

- **Unidade funcional:** desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como unidade de referência (ABNT NBR ISO 14040).
- **Vida útil (VU):** período de tempo durante o qual um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos.
- **Vida útil de projeto (VUP):** período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o atendimento da periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (ABNT NBR 15575-1).

5. Simbologia

A seguir, é apresentada a simbologia adotada ao longo deste Boletim Técnico.

5.1. Letras minúsculas

- $c_{\text{biomassa-nr}}$: fator de emissão de CO_2 de biomassa não renovável
- c_{carb} : fator de emissão de CO_2 de carbonato
- $c_{\text{carb},i}$: fator de emissão de CO_2 do carbonato “i”
- c_{comb} : fator de emissão de CO_2 de combustível
- $c_{\text{comb},i}$: fator de emissão de CO_2 do combustível “i”
- c_{ele} : fator de emissão de CO_2 da eletricidade
- $c_{\text{ele},A1}$: fator de emissão de CO_2 da eletricidade na etapa de geração
- c_i : fator de emissão de CO_2 do item de inventário “i”
- \bar{c}_i : estimativa central do fator de emissão de CO_2 do item de inventário “i”
- $c_{i,\text{max}}$: fator de emissão de CO_2 máximo do item de inventário “i”
- $c_{i,\text{min}}$: fator de emissão de CO_2 mínimo do item de inventário “i”
- c_{mat} : fator de emissão de CO_2 de material processado
- $c_{\text{mat},i,A1}$: fator de emissão de CO_2 do material processado “i” na etapa de fornecimento das matérias-primas (A1)
- $c_{\text{mat},i,A1-A3}$: fator de emissão de CO_2 do material processado “i” no estágio de produto (A1 a A3)
- c_{res} : fator de emissão de CO_2 de resíduo
- $c_{\text{res},i,C3-C4}$: fator de emissão de CO_2 do resíduo “i” na etapa de processamento para reciclagem ou disposição final (C3 a C4)
- $c_{\text{res},i,C3}$: fator de emissão de CO_2 do resíduo “i” na etapa de processamento para reciclagem (C3)
- $c_{\text{res},i,C4}$: fator de emissão de CO_2 do resíduo “i” na etapa de disposição final (C4)
- $c_{\text{tr},i}$: fator de emissão de CO_2 do modo de transporte adotado para o item de inventário “i”
- $d_{\text{tr},i}$: distância de transporte do item de inventário “i”
- $\text{dp}(C)$: desvio padrão da emissão de CO_2
- $\text{dp}(c_i)$: desvio padrão do fator de emissão de CO_2 do item de inventário “i”

- m_i : fator de conversão em massa do item de inventário “i”
- $q_{\text{biomassa seca}}$: quantidade de biomassa seca
- q_{calc} : quantidade de carbonato submetido à calcinação
- $q_{\text{calc},i,A3}$: quantidade do carbonato “i” na etapa de fabricação (A3)
- q_{comb} : quantidade de combustível
- $q_{\text{comb},i,A3}$: quantidade do combustível “i” submetido à calcinação na etapa de fabricação (A3)
- $q_{\text{comb},i,A5}$: quantidade do combustível “i” na etapa do processo construtivo (A5)
- $q_{\text{comb},i,C1}$: quantidade do combustível “i” na etapa de demolição (C1)
- $q_{\text{ele},A3}$: quantidade de eletricidade consumida na etapa de fabricação (A3)
- $q_{\text{ele},A5}$: quantidade de eletricidade consumida na etapa do processo construtivo (A5)
- $q_{\text{ele},C1}$: quantidade de eletricidade consumida na etapa de demolição (C1)
- q_i : quantidade do item de inventário “i”
- $q_{i,A3}$: quantidade do item de inventário “i” na etapa de fabricação (A3)
- $q_{i,j}$: quantidade do item de inventário “i” alocada ao produto “j”
- $q_{i,\text{max}}$: quantidade máxima do item de inventário “i”
- $q_{i,\text{min}}$: quantidade mínima do item de inventário “i”
- $q_{\text{mat},i,A3}$: quantidade do material processado “i” na etapa de fabricação (A3)
- $q_{\text{mat},i,B4}$: quantidade do material processado “i” na etapa de substituição (B4)
- $q_{\text{res},i,A3}$: quantidade do resíduo “i” na etapa de fabricação (A3)
- $q_{\text{res},i,A5}$: quantidade do resíduo “i” na etapa do processo construtivo (A5)
- $q_{\text{res},i,B4}$: quantidade do resíduo “i” na etapa de substituição (B4)
- $q_{\text{res},i,C3-C4}$: quantidade do resíduo “i” na etapa de processamento para reciclagem ou disposição final (C3 a C4)
- $q_{\text{res},i,C3}$: quantidade do resíduo “i” na etapa de demolição destinada ao processamento para reuso ou reciclagem (C3)
- $q_{\text{res},i,C4}$: quantidade do resíduo “i” na etapa de demolição destinada à disposição final (C4)
- q'_i : quantidade do item de inventário “i”, sem perdas
- $q'_{i,A3}$: quantidade do item de inventário “i” na etapa de fabricação (A3), sem perdas
- $q'_{\text{mat},i}$: quantidade do material processado “i” especificada em projeto, sem perdas
- $q'_{\text{mat},i,A3}$: quantidade do material processado “i” consumida na etapa de fabricação (A3), sem perdas
- $q''_{i,A3}$: quantidade do item de inventário “i” desperdiçada na etapa de fabricação (A3)
- $q''_{\text{mat},i,A3}$: quantidade do material processado “i” desperdiçada na etapa de fabricação (A3)
- $q''_{\text{mat},i,A5}$: quantidade do material processado “i” desperdiçada na etapa do processo construtivo (A5)

5.2. Letras maiúsculas

- C_{A1} : emissão de CO_2 da etapa de extração das matérias-primas (A1)
- C_{A1-A3} : emissão de CO_2 do estágio de produto (A1 a A3)
- C_{A2} : emissão de CO_2 da etapa de transporte das matérias-primas (A2)
- C_{A3} : emissão de CO_2 da etapa de fabricação (A3)
- $C_{A3,A1}$: emissão de CO_2 da etapa de fabricação (A3) devida à extração de matérias-primas (A1) desperdiçadas no processo de fabricação
- C_{A4} : emissão de CO_2 da etapa de transporte até a obra (A4)
- C_{A5} : emissão de CO_2 da etapa do processo construtivo (A5)
- $C_{A5,A1-A3}$: emissão de CO_2 da etapa de processo construtivo (A5) devida à fabricação (estágio de produto, A1 a A3) dos materiais desperdiçados no processo construtivo
- $C_{A5,A4}$: emissão de CO_2 da etapa de processo construtivo (A5) devida ao transporte (A4) dos materiais desperdiçados no processo construtivo
- $C_{A5,C2}$: emissão de CO_2 da etapa de processo construtivo (A5) devida ao transporte dos resíduos (C2) gerados no processo construtivo
- $C_{A5,C3-C4}$: emissão de CO_2 da etapa de processo construtivo (A5) devida ao processamento para reciclagem (C3) ou disposição final (C4) dos resíduos gerados no processo construtivo
- C_{B4} : emissão de CO_2 da etapa de substituição de materiais durante o estágio de uso (B4)
- $C_{B4,A1-A3}$: emissão de CO_2 da etapa de substituição de materiais (B4) devida à fabricação (estágio de produto, A1 a A3) dos materiais a serem substituídos
- $C_{B4,A4}$: emissão de CO_2 da etapa de substituição de materiais (B4) devida ao transporte (A4) dos materiais a serem substituídos
- $C_{B4,C2}$: emissão de CO_2 da etapa de substituição de materiais (B4) devida ao transporte dos resíduos gerados (C2) na etapa de substituição
- $C_{B4,C3-C4}$: emissão de CO_2 da etapa de substituição de materiais (B4) devida ao processamento para reciclagem (C3) ou disposição final (C4) dos resíduos gerados na etapa de substituição
- C_{biomassa} : emissão de CO_2 devida à queima ou decomposição de biomassa
- $C_{\text{biomassa-nr}}$: emissão de CO_2 devida à queima ou decomposição de biomassa não renovável
- C_{C1} : emissão de CO_2 da etapa de demolição (C1)
- C_{C2} : emissão de CO_2 da etapa de transporte dos resíduos de demolição (C2)
- C_{C3} : emissão de CO_2 da etapa de processamento dos resíduos de demolição para reuso ou reciclagem (C3)
- C_{C4} : emissão de CO_2 da etapa de disposição final dos resíduos de demolição (C4)
- C_{carb} : remoção de CO_2 devida à carbonatação
- C_{calc} : emissão de CO_2 devida à calcinação
- $C_{\text{calc,A3}}$: emissão de CO_2 da etapa de fabricação (A3) devida à calcinação
- C_{comb} : emissão de CO_2 devida à queima de combustível fóssil

- $C_{\text{comb},A3}$: emissão de CO₂ da etapa de fabricação (A3) devida à queima de combustível fóssil
- $C_{\text{comb},A5}$: emissão de CO₂ da etapa do processo construtivo (A5) devida à queima de combustível fóssil
- $C_{\text{comb},C1}$: emissão de CO₂ da etapa de demolição (C1) devida à queima de combustível fóssil
- C_{diesel} : emissão de CO₂ devida à combustão de diesel
- C_{ele} : emissão de CO₂ devida à eletricidade
- $C_{\text{ele},A1}$: emissão de CO₂ devida à geração da eletricidade (A1)
- $C_{\text{ele},A3}$: emissão de CO₂ da etapa de fabricação (A3) devida à eletricidade
- $C_{\text{ele},A5}$: emissão de CO₂ da etapa do processo construtivo (A5) devida à eletricidade
- $C_{\text{ele},C1}$: emissão de CO₂ da etapa de demolição (C1) devida à eletricidade
- C_j : emissão de CO₂ do produto “j”
- C_{mat} : emissão de CO₂ devida aos materiais processados
- $C_{\text{mat},A1}$: emissão de CO₂ da etapa de extração das matérias-primas (A1) devida aos materiais processados
- $C_{\text{mat},A1-A3}$: emissão de CO₂ do estágio de produto (A1 a A3) devida aos materiais processados
- C_{max} : emissão de CO₂ máxima
- C_{min} : emissão de CO₂ mínima
- $C_{\text{perdas},A3}$: emissão de CO₂ da etapa de fabricação (A3) devida às perdas de material
- $C_{\text{perdas},A5}$: emissão de CO₂ da etapa de processo construtivo (A5) devida às perdas de material
- C_{res} : emissão de CO₂ devida à disposição de resíduos
- $C_{\text{res},A1-A3}$: emissão de CO₂ do estágio de produto (A1 a A3) devida à disposição de resíduos
- C_{tr} : emissão de CO₂ devida ao transporte
- $C_{\text{tr},A1-A3}$: emissão de CO₂ do estágio de produto (A1 a A3) devida ao transporte de insumos
- $C_{\text{tr},res,A1-A3}$: emissão de CO₂ do estágio de produto (A1 a A3) devida ao transporte de resíduos
- \bar{C} : estimativa central da emissão de CO₂
- M: consumo de material
- Q_i : quantidade total do item de inventário “i”
- Q_{prod} : quantidade total do produto
- $Q_{\text{prod},j}$: quantidade total do produto “j”

5.3. Letras gregas

- $\alpha_{\text{prod},j}$: fator de alocação do produto “j”

5.4. Siglas

- ACV: Avaliação do Ciclo de Vida
- DAP: Declaração Ambiental de Produto
- EFCA: *European Federation of Concrete Admixture Associations*
- EPD: *Environmental Product Declaration*
- GWP: *Global Warming Potential*
- ICV: Inventário do Ciclo de Vida
- IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- PR: período de referência
- Sidac: Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção
- UD: Unidade Declarada
- UD_i: Unidade Declarada do item “i”
- UF: Unidade Funcional
- VU: vida útil
- VUP: vida útil de projeto

6. Abordagem do Ciclo de Vida

O método de quantificação das emissões de CO₂ apresentado é baseado em alguns conceitos principais da **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. De um modo geral, a ACV consiste em quantificar os fluxos de massa e de energia que ocorrem nos **processos** que fazem parte do **ciclo de vida** de um determinado **produto**, o que resulta no **Inventário do Ciclo de Vida (ICV)** do produto. Os fluxos de inventário são então convertidos em indicadores de desempenho ambiental, expressos em relação a uma unidade de referência que representa a função do produto, denominada **unidade funcional**.

A Figura 1 ilustra a abordagem do ciclo de vida, utilizando o exemplo de uma estrutura de concreto armado moldada in-loco, do berço ao túmulo. Trata-se de um exemplo de **sistema de produto**, que é o nome dado ao conjunto de processos e fluxos que modelam o ciclo de vida de um produto. Cada processo que integra o sistema de produto, com suas entradas e saídas, recebe o nome de **processo elementar**. As entradas e saídas podem ser **fluxos de produto** (qualquer item que passa por processamento antes ou após o processo) ou **fluxos elementares** (entradas e saídas diretamente da natureza). Os critérios que determinam quais processos elementares integram um sistema de produto são chamados de **fronteira do sistema**. A Figura 1 também ilustra outras possíveis fronteiras do sistema, como do berço ao portão (desde a extração dos recursos naturais até o portão da fábrica dos materiais de construção) e do berço à obra (desde a extração dos recursos naturais até o término da obra).

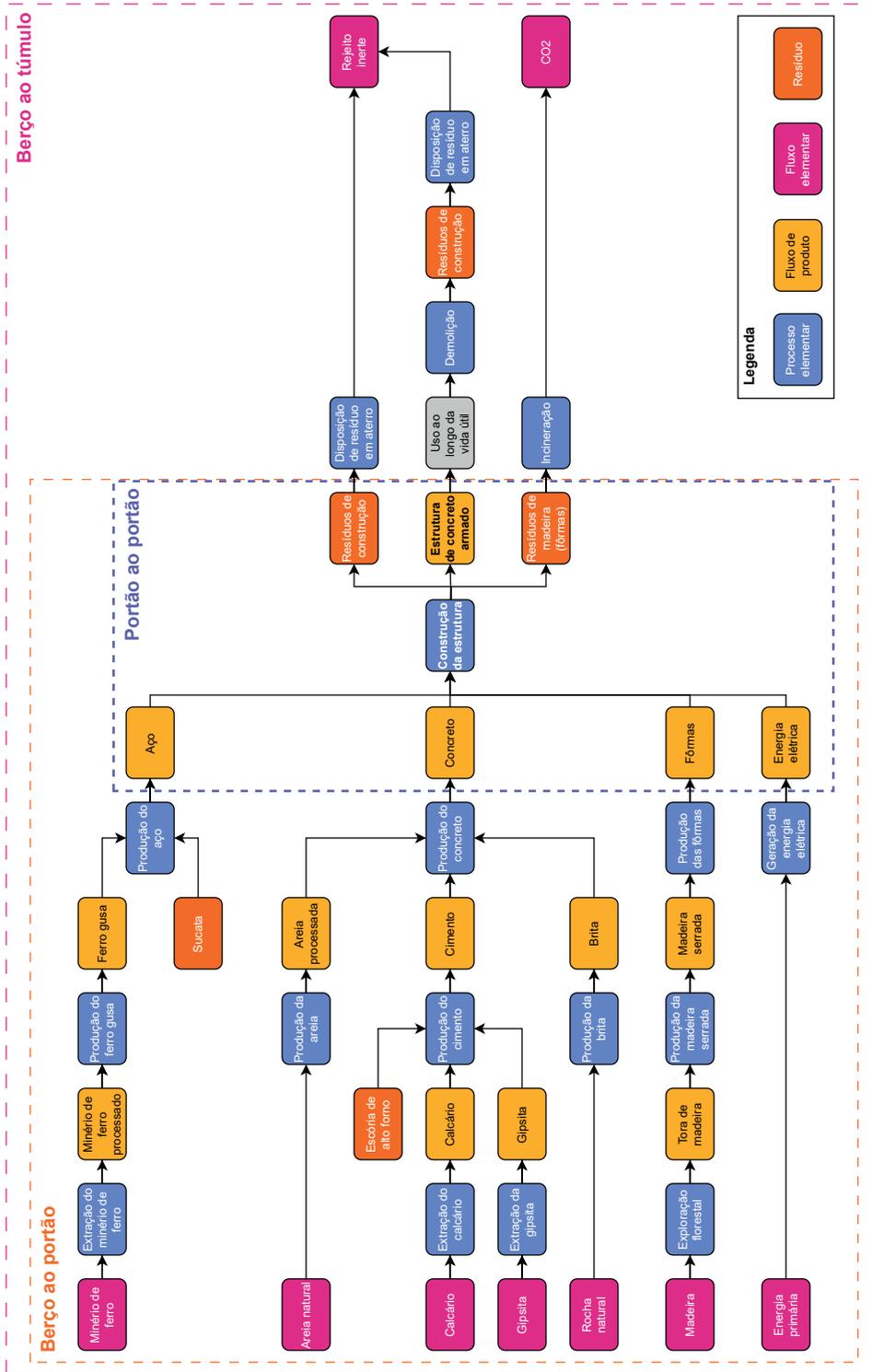


Figura 1 – Ilustração do ciclo de vida de uma estrutura de concreto armado moldada in-loco, desde a extração dos recursos naturais (berço) até a disposição dos resíduos de demolição ao fim de sua vida útil (túmulo). Trata-se de uma representação simplificada, pois apenas as principais entradas e saídas estão identificadas (os combustíveis usados em alguns processos, por exemplo, não estão representados na figura, assim como os escoramentos ou outros tipos de matérias-primas utilizadas na produção de cimento; por exemplo, pozolanas). Devido à limitação de espaço, os processos de transporte também foram omitidos.

Uma vez modelado o sistema de produto, é necessário quantificar os **fluxos de inventário**, que devem ser normalizados em relação à unidade funcional que, no exemplo citado, pode ser 1 m² de estrutura de um edifício submetido a uma determinada solicitação, exposto a uma determinada classe de agressividade ambiental. De posse do inventário do ciclo de vida, são calculados os **indicadores de desempenho ambiental** do produto (a Figura 2 ilustra graficamente como é feito o cálculo). Por exemplo, pode-se calcular quantos quilogramas de CO₂ são emitidos para produzir 1 m² da estrutura de concreto armado analisada.

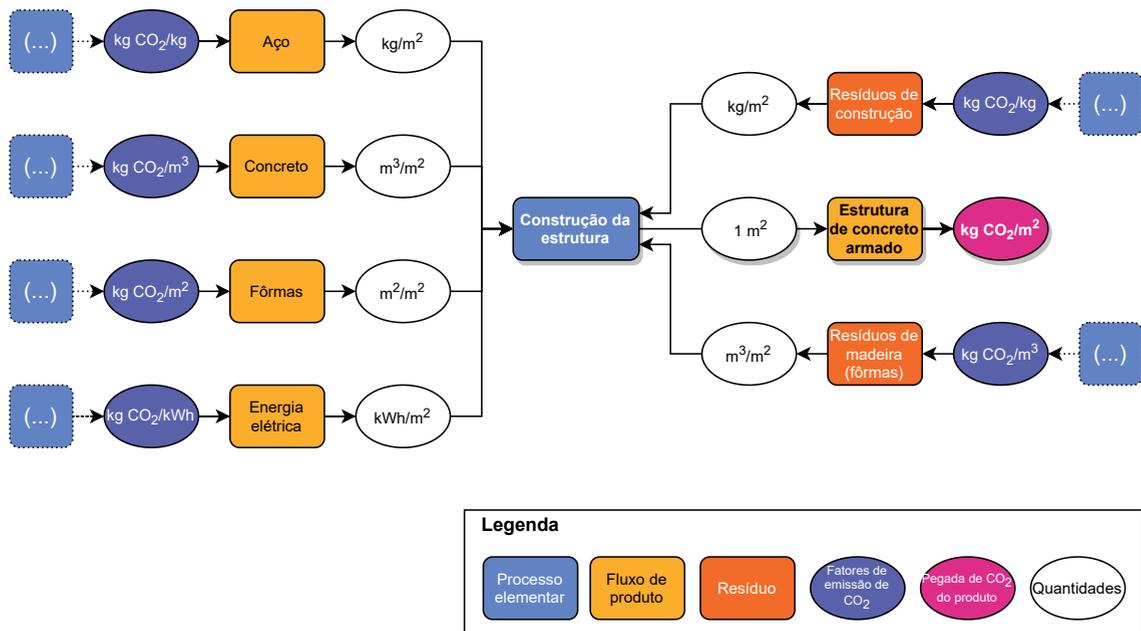


Figura 2 – Ilustração da lógica de cálculo dos indicadores de desempenho ambiental, considerando o exemplo de uma estrutura de concreto armado moldada *in-loco*.

A principal diferença entre a ACV e o método descrito no presente Boletim Técnico é que o presente método considera apenas a etapa de inventário, calculando o consumo de material (em kg) e as emissões de CO₂ (em kg CO₂). Na ACV, há ainda a etapa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV); por exemplo, ao invés de calcular apenas as emissões de CO₂, a ACV avalia o Potencial de Aquecimento Global, que requer medir ou estimar a emissão dos diversos gases de efeito estufa (CH₄, N₂O, compostos halogenados, entre outros). As quantidades de cada gás são multiplicadas por fatores de caracterização, que expressam o “potencial de aquecimento” de cada gás comparativamente ao do CO₂ (no caso do metano, por exemplo, o fator é 28 de acordo com o IPCC), e o resultado final é expresso em kg CO₂ equivalente.

Optou-se por quantificar apenas a emissão de CO₂, pois este gás é responsável por 75% do potencial de aquecimento global total [21] e por mais de 90% do potencial de aquecimento global dos principais materiais de construção e dos edifícios [22]. Além disso, a emissão de CO₂ pode ser facilmente calculada com base em fatores de emissão com baixo nível de incerteza, o que não é possível para os outros gases de efeito estufa.

Ou seja, o método aqui descrito considera apenas um dos indicadores relevantes para a construção. A principal razão para tal simplificação consiste em permitir que o indicador de emissões incorporadas de CO₂ possa ser calculado com

base em **dados primários** e, portanto, passíveis de verificação, o que é essencial para indicadores serem utilizados no apoio à tomada de decisão. Por preservar a lógica e os conceitos da ACV, este método consiste em uma abordagem complementar à ACV, pois é possível complementar o inventário simplificado aqui proposto para realizar uma ACV convencional e, da mesma forma, é possível extrair do inventário da ACV convencional as informações requeridas para calcular o indicador especificado neste documento.

A abordagem do ciclo de vida é necessária, pois é frequente que decisões tomadas com foco em um estágio do ciclo de vida tenha impacto sobre outros estágios, sobretudo na construção, que é caracterizada por ativos com longa vida útil. Por exemplo, a adoção de concreto de alta resistência à compressão em uma estrutura pode possibilitar a redução da seção transversal de elementos estruturais e, conseqüentemente, do consumo de material durante a obra (m³); entretanto, concretos de alta resistência exigem um maior teor de cimento e, portanto, tendem a exibir maior emissão unitária de CO₂ (kg CO₂/m³). Apenas a quantificação das emissões de CO₂ do berço à obra permite avaliar, por exemplo, se vale a pena adotar uma estrutura com menor volume de concreto, mas que tenha maior emissão de CO₂ por m³, em comparação a uma estrutura convencional. Seno assim, a abordagem do ciclo de vida contribui para decisões mais otimizadas [23].

7. Definição do Escopo da Quantificação

A primeira etapa para quantificar as emissões incorporadas de CO₂ consiste em definir o escopo da análise, que determina a sua abrangência e fornece a base para planejar a coleta de dados. A seguir, serão detalhados cada um dos aspectos que integram a definição do escopo da análise.

7.1. Definição do objetivo da quantificação

A avaliação de indicadores de desempenho ambiental de materiais de construção ou estruturas pode ter diferentes objetivos, e cada um requer uma abordagem específica, com um escopo específico. Entre os objetivos mais comuns, estão:

- **Melhorar o desempenho ambiental de um material ou estrutura:** para isso, é necessário quantificar os indicadores de desempenho ambiental do produto em questão, com um nível de detalhe tal que permita quantificar a contribuição de cada processo para os indicadores totais, possibilitando identificar as principais causas de impactos ambientais para priorizar medidas de melhoria do desempenho ambiental;
- **Comunicar o desempenho ambiental de um material ou estrutura:** nesse caso, também é necessário quantificar os indicadores de desempenho ambiental; entretanto, o nível de detalhe dependerá do tipo de comunicação a ser feita e do público-alvo. No caso de Declarações Ambientais de Produto (DAPs), por exemplo, há regras específicas a serem seguidas, conforme estabelecem as normas técnicas pertinentes às DAPs;
- **Comparar o desempenho ambiental de materiais ou estruturas com desempenho equivalente:** trata-se da aplicação mais delicada dos indicadores de desempenho ambiental, pois é necessário garantir que as alternativas comparadas tenham o mesmo desempenho técnico, ou seja, o mesmo comportamento em uso. Além disso, é necessário que os dados do inventário do ciclo de vida das alternativas comparadas tenham o mesmo nível de qualidade (não se deve,

por exemplo, comparar um produto “A” modelado com base em dados primários nacionais com um produto “B” para o qual só há dados internacionais e pouco representativos) [24]. Caso a comparação seja voltada ao público externo, é necessária uma verificação de terceira parte independente, para garantir que as premissas necessárias para uma comparação justa tenham sido seguidas.

7.2. Unidade funcional ou declarada

Com base no objetivo definido para a quantificação, deve-se definir a **unidade funcional** em relação à qual o indicador de emissões incorporadas de CO₂ será expresso. A unidade funcional é o “desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como unidade de referência” [10]; ou seja, ela deve considerar o desempenho do produto em questão, preferencialmente descrito por meio de critérios técnicos.

No caso da estrutura de um edifício, a unidade funcional pode ser 1 m² de estrutura de um edifício submetido a uma determinada solicitação, exposto a uma determinada classe de agressividade ambiental; neste caso, é importante definir o tipo de área (por exemplo, se é área construída ou área útil). Dessa forma, é possível comparar os resultados de desempenho ambiental de diferentes soluções estruturais, desde que apresentem o mesmo desempenho técnico (em termos de segurança estrutural e durabilidade, por exemplo).

A partir da unidade funcional, podem ser definidos os **fluxos de referência**, ou seja, as quantidades dos produtos necessários para satisfazer a função expressa pela unidade funcional. Por exemplo, uma estrutura de concreto armado moldada in loco terá quantidades de concreto e aço (fluxos de referência) diferentes de uma estrutura pré-moldada com lajes alveolares, mesmo se ambas forem projetadas para cumprir a mesma função.

Principalmente no caso de materiais, pode ser impossível determinar uma função, uma vez que esta normalmente depende da aplicação do material. Neste caso, adota-se o termo **unidade declarada**. Exemplos de unidade declarada são: 1 kg de cimento de um determinado tipo (por exemplo, CP II-Z 40), 1 m³ de concreto com f_{ck} 25 MPa e slump 100 mm, 1 kg de vergalhão de aço CA-50, entre outros. Mesmo no caso de se adotar uma unidade declarada, recomenda-se descrever as características técnicas que qualificam o produto em questão, preferencialmente baseadas nas normas técnicas pertinentes.

No caso de estruturas, recomenda-se que a descrição da unidade funcional contenha, no mínimo, o tipo de edificação e ocupação, requisitos técnicos e funcionais relevantes (por exemplo, carregamentos aos quais a edificação está exposta, tempo requerido de resistência ao fogo, entre outros) e vida útil. Além disso, no caso de edifícios, para permitir a comparação dos indicadores de desempenho ambiental entre estruturas e o estabelecimento de benchmarks, recomenda-se que os indicadores sejam expressos em relação à **área construída (m²)**.

7.3. Fronteira da quantificação

A declaração da fronteira da quantificação engloba a definição de quais etapas do ciclo de vida e quais elementos construtivos (no caso de edifícios) serão considerados. A compreensão desses limites é fundamental para uma interpretação adequada dos resultados. Por exemplo, ao comparar as emissões de CO₂ de uma edificação a um benchmark existente, deve-se garantir que a fronteira do sistema de produto equivale àquela do benchmark.

7.3.1. Etapas do ciclo de vida

É necessário definir quais etapas do ciclo de vida serão consideradas na análise, pois nem sempre é necessário considerar todo o ciclo de vida (berço ao túmulo). Por exemplo, em um estudo comparativo, pode-se omitir as etapas para as quais não há diferenças entre as alternativas analisadas.

As normas de ACV e DAP para construção ISO 21930, EN 15978 e EN 15804 propõem uma divisão padronizada das etapas do ciclo de vida de uma edificação em **módulos de informação**, como mostra o Quadro 1. Convém adotar esta divisão para declarar o escopo da quantificação, uma vez que ela é de amplo uso na comunidade internacional e que DAPs podem servir como fonte de informação para as análises descritas neste documento. A Tabela 1 apresenta o que deve ser considerado em cada etapa, com exemplos.

Quadro 1 – Estágios e etapas do ciclo de vida de uma edificação, com os respectivos módulos de informação.

Estágio de produto			Estágio do processo construtivo		Estágio de uso					Estágio de fim de vida				Benefícios e cargas além da fronteira do sistema
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
Produção das matérias-primas	Transporte	Fabricação dos produtos de construção	Transporte	Construção da edificação	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Reforma	Desconstrução / Demolição	Transporte dos resíduos	Processamento para reuso ou reciclagem	Disposição final de resíduos	Potencial de reuso, recuperação ou reciclagem
					B6	Uso operacional de energia								
					B7	Uso operacional de água								
					Emissões incorporadas					Emissões operacionais				

Tabela 1 – Detalhamento do que deve ser considerado em cada módulo de informação.

Módulo	Etapas	O que considerar?	Exemplos
Estágio de produto			
A1	Produção das matérias-primas	Processos de extração de recursos diretamente da natureza e/ou de produção de matérias-primas	Extração do calcário para a produção de cimento, extração do minério de ferro para a produção de aço, extração de areia para a produção de concreto.
A2	Transporte	Transporte dos recursos naturais extraídos até fábricas para beneficiamento	Transporte do calcário até a fábrica de cimento, transporte do minério de ferro até a siderúrgica, transporte da areia até a central de concreto.

Módulo	Etapa	O que considerar?	Exemplos
A3	Fabricação dos produtos de construção	Processos de fabricação dos produtos de construção	Produção do cimento, produção do aço, produção do concreto, produção de elementos pré-moldados.
Estágio do processo construtivo			
A4	Transporte	Transporte dos produtos desde as respectivas fábricas até a obra	Transporte do vergalhão até a obra, transporte do concreto até a obra, transporte de elementos pré-moldados até a obra.
A5	Construção do edifício	Processo construtivo, inclusive a produção e transporte dos materiais correspondentes às perdas durante a construção e a disposição dos resíduos gerados, além de perdas incorporadas	Bombeamento do concreto, uso da grua para transporte vertical de materiais, montagem de estruturas pré-moldadas, perdas de concreto (produção e transporte da quantidade de concreto desperdiçada, bem como transporte e aterramento do resíduo de concreto), perdas incorporadas (aumento da espessura de elementos construtivos).
Estágio de uso			
B1	Uso	Processos que ocorrem durante o uso previsto da edificação	Absorção de CO ₂ pela carbonatação de materiais cimentícios.
B2	Manutenção	Processos para manutenção preventiva da edificação, conforme condições previstas no manual do usuário.	Aplicação de produto hidrofugante em estruturas de concreto aparentes.
B3	Reparo	Processos para manutenção corretiva (não planejada) da edificação, incluindo produção e transporte dos materiais utilizados e disposição dos resíduos gerados.	Recuperação de fissuras em estruturas de concreto.
B4	Substituição	Processos para substituição planejada de componentes cuja vida útil seja inferior à vida útil de projeto da edificação.	Substituição de telhas de fibrocimento, aplicação de selante entre peças pré-moldadas de concreto.
B5	Reforma	Reformas que alterem significativamente as características do edifício	Retrofit de edifício, com mudança de uso.
B6	Uso operacional de energia	Operação dos sistemas diretamente relacionados ao edifício: iluminação, climatização, aquecimento de água, transporte vertical.	Consumo de energia elétrica para iluminação, ar condicionado, elevadores e motobombas; consumo de gás em aquecedores de passagem.
B7	Uso operacional de água	Consumo de água e tratamento do esgoto gerado no edifício.	Consumo de água (inclusive perdas), destinação do esgoto para tratamento.
Estágio de fim de vida			
C1	Desconstrução ou demolição	Processos associados à desconstrução ou demolição do edifício.	Uso de rompedores, marteletes e outros equipamentos de demolição, desmontagem de estruturas pré-moldadas de concreto.
C2	Transporte dos resíduos	Transporte dos resíduos do local da demolição até a destinação.	Transporte de resíduos para áreas de transbordo e triagem (ATT), cooperativas de reciclagem ou aterro de inertes; transporte de elementos pré-moldados desmontados para reparos e posterior reuso.

Módulo	Etapa	O que considerar?	Exemplos
C3	Processamento para reuso ou reciclagem	Processamento dos resíduos até que eles atinjam o estado de fim de resíduo (vide explicação após a Tabela)	Separação de sucata metálica, triagem de RCD para posterior reciclagem, reparo de elementos pré-moldados desmontados.
C4	Disposição final dos resíduos	Impactos associados à disposição final dos resíduos (rejeitos)	Incineração de resíduos combustíveis, operação de aterro de resíduos inertes, emissões de aterros sanitários, carbonatação de resíduos de materiais cimentícios.
Benefícios e cargas além da fronteira do sistema			
D	Potencial de reuso, recuperação ou reciclagem	Impactos (positivos ou negativos) que ocorrem após o término da vida útil do edifício, em função de materiais que podem ser reusados, recuperados ou reciclados no ciclo de vida de outros produtos	Impactos “evitados” pelo uso de sucata metálica em substituição ao aço virgem, ou pelo uso de agregado reciclado em substituição ao agregado virgem, ou pelo reuso de elementos pré-moldados em novas estruturas.

As emissões de CO₂ incorporadas (*embodied carbon*) são todas aquelas associadas à extração, transporte, processamento, uso e disposição dos materiais de construção. As emissões de CO₂ operacionais (*operational carbon*), por sua vez, dizem respeito exclusivamente às emissões associadas ao consumo energético (eletricidade e combustíveis) para operação do edifício e ao consumo de água e correspondente geração de efluentes no edifício. **Este Boletim Técnico trata apenas das emissões de CO₂ incorporadas.**

No estágio de produto, normalmente se tem muito mais processos elementares do que as três etapas representadas pelos módulos de informação A1, A2 e A3; além disso, a forma como os processos elementares são alocados aos módulos de informação muda conforme a perspectiva da análise, como ilustram a Figura 3 (diferença de perspectiva entre a produção de cimento e de concreto) e a Figura 4 (diferença de perspectiva entre a produção de estruturas moldadas in-loco e pré-moldadas). Por exemplo, a fabricação do cimento é enquadrada no módulo A3 sob a perspectiva do fabricante de cimento, enquanto pela perspectiva do fabricante de concreto, o cimento é uma matéria-prima e, portanto, é enquadrado no módulo A1. No exemplo da estrutura, a produção de fôrmas é enquadrada no módulo A3 para a estrutura moldada in-loco, enquanto para a produção de elementos pré-moldados, as fôrmas são enquadradas no módulo A1.

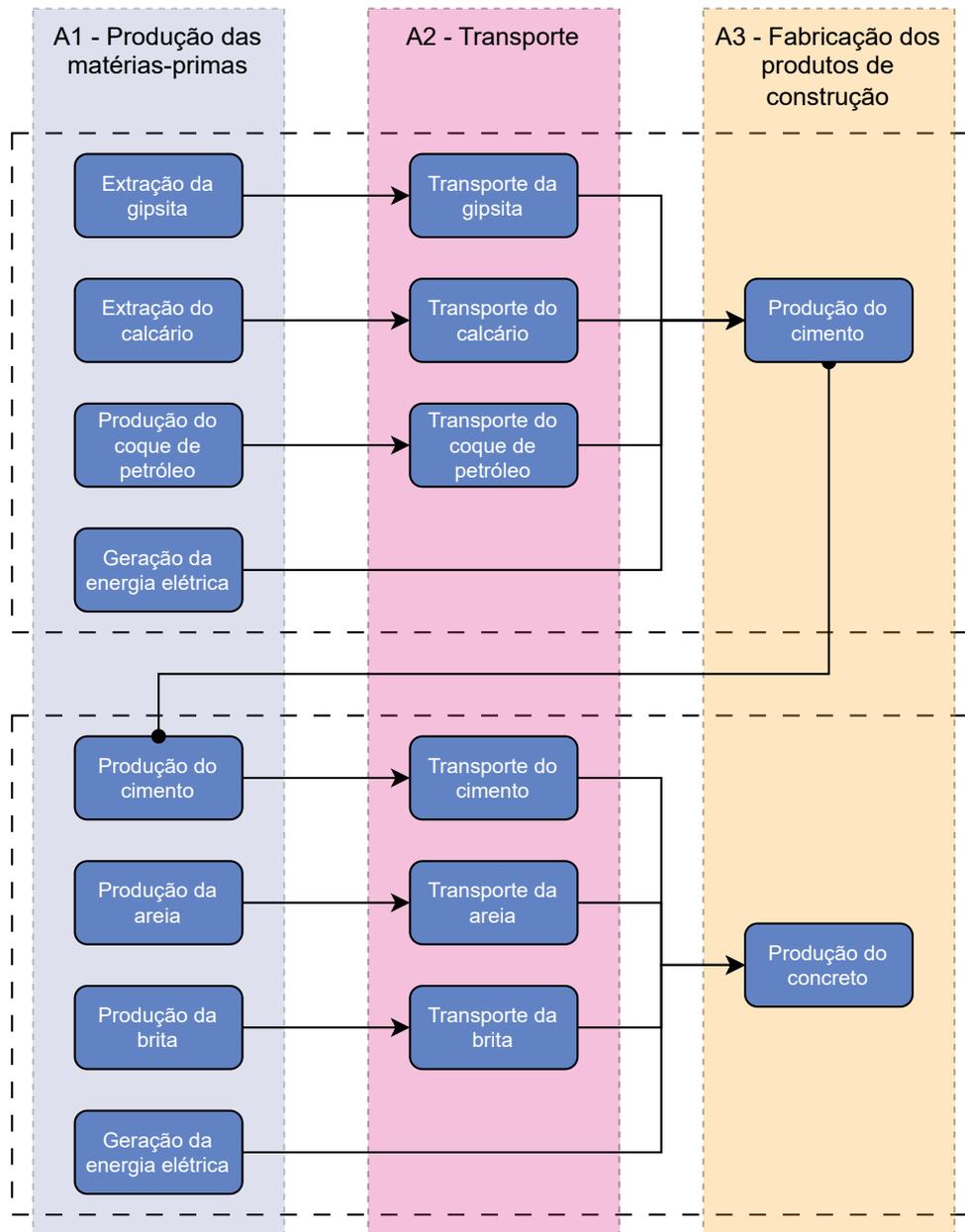


Figura 3 – Enquadramento dos processos elementares nos módulos de informação adotados para descrever o ciclo de vida. Dependendo do produto, o processo pode ser enquadrado em um módulo diferente, como ilustrado para o exemplo do cimento e do concreto. Tratam-se de exemplos simplificados, que não consideram todos os processos que integram o ciclo de vida destes produtos, apenas para ilustrar o enquadramento dos processos nos diferentes módulos de informação.

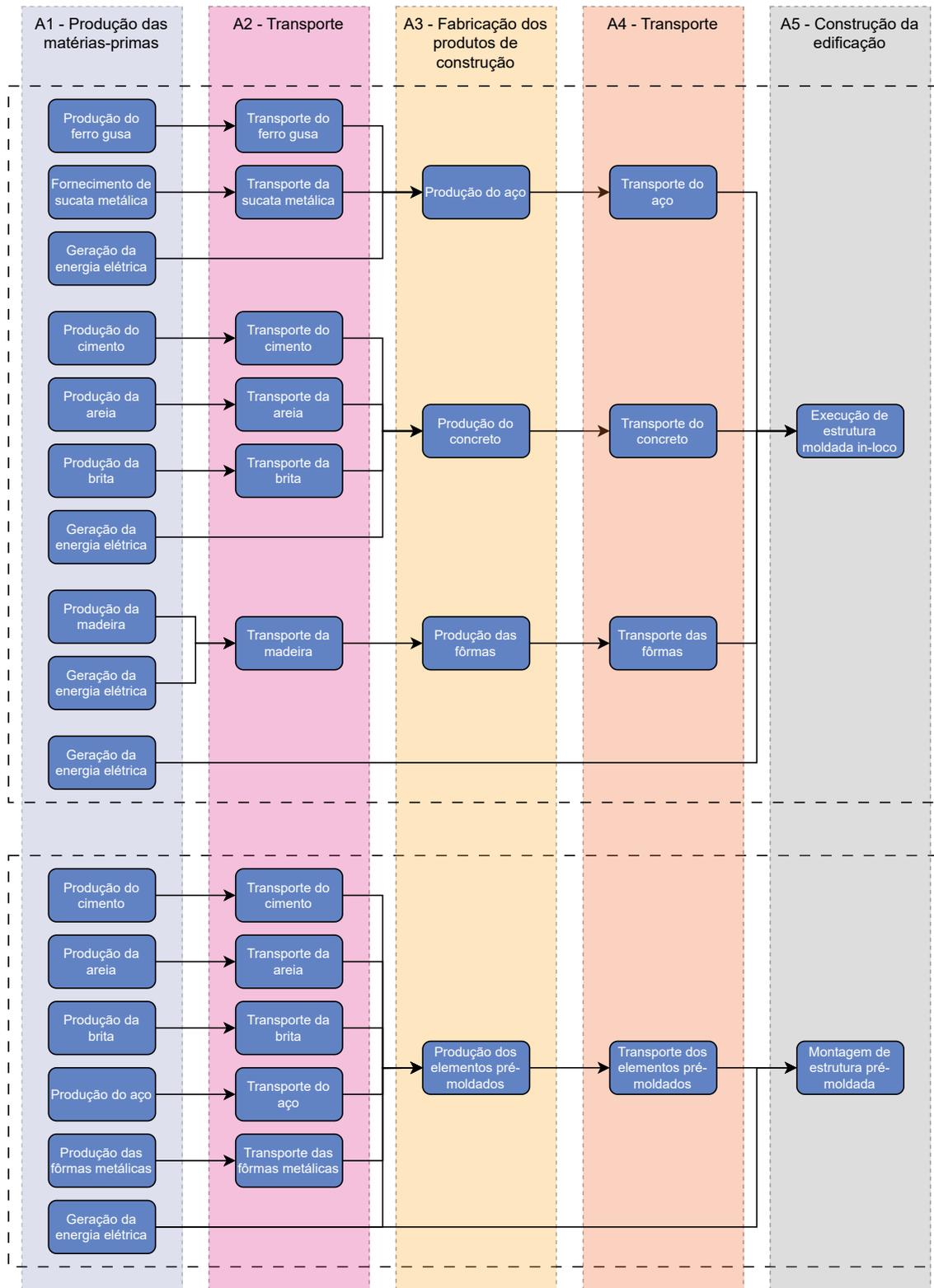


Figura 4 – Enquadramento dos processos elementares nos módulos de informação adotados para descrever o ciclo de vida. O exemplo da figura ilustra a diferença de enquadramento para uma estrutura de concreto moldada *in-loco* e pré-moldada (com produção do concreto dentro da fábrica de pré-moldados).

No caso de reuso ou reciclagem de resíduos, a EN 15804, baseada no regulamento europeu sobre resíduos, estabelece que o estado de fim de resíduo (*end-of-waste state*) é atingido quando todas as seguintes condições são atendidas:

- a) Existe aplicação para o material recuperado;
- b) Existe demanda de mercado pelo material recuperado;
- c) O material recuperado atende aos requisitos técnicos e exigências legais pertinentes;
- d) O uso do material recuperado não causa impactos adversos ao meio ambiente ou à saúde humana.

Satisfeitas essas condições, o material pode ser considerado como material secundário disponível para outros usos. Ou seja, todos os processos necessários até que o resíduo atinja o estado de fim de resíduo (módulo C3) são de responsabilidade do produto que gerou aquele resíduo (princípio do poluidor-pagador).

O módulo D diz respeito a impactos (positivos ou negativos) que ocorrem além do ciclo de vida do produto, em função do uso de recursos secundários gerados ao longo do seu ciclo de vida. Por exemplo, um edifício feito de elementos pré-moldados de concreto pode ser desmontado ao fim da sua vida útil e suas peças reutilizadas em outras obras, evitando assim a produção de novas peças de concreto armado, sendo este um potencial benefício ambiental futuro. De acordo com as normas de ACV, quaisquer potenciais benefícios deste tipo que sejam gerados ao longo do ciclo de vida são considerados no módulo D e reportados separadamente, ou seja, não podem ser “descontados” dos impactos ambientais do produto principal, devido às incertezas sobre a efetivação destes benefícios no futuro. Entretanto, como a contabilização de tais benefícios é baseada em cenários hipotéticos com alto nível de incerteza e considerando a longa vida útil de estruturas de concreto, este documento não considerará benefícios e cargas além da vida útil (módulo D).

7.3.2. Elementos construtivos

No caso das estruturas, além das etapas do ciclo de vida, faz parte da declaração da fronteira da análise a especificação de quais elementos construtivos são considerados. Por exemplo, para comparar o desempenho entre uma estrutura reticulada de concreto armado e paredes de concreto, é necessário considerar as paredes de alvenaria que constituem as vedações da estrutura reticulada, bem como o revestimento de argamassa e a fundação (esta última devido às possíveis diferenças de peso próprio dos dois sistemas estruturais e elementos construtivos associados).

7.4. Período de referência

O período de referência (*Reference Study Period – RSP*) é o período ao longo do qual o produto ou a edificação serão analisados. No caso de uma avaliação do desempenho ambiental de um edifício, do berço ao túmulo, devem ser considerados todos os processos que ocorrem ao longo do período de referência, incluindo manutenções e substituições de componentes construtivos cuja vida útil seja inferior à do edifício. Usualmente, o período de referência equivale à vida útil de projeto mínima requerida para a edificação.

7.5. Escopo mínimo

A seguir, é descrito o escopo mínimo recomendado para quantificar as emissões de CO₂ incorporadas em materiais cimentícios e estruturas de concreto. A depender do contexto da análise, escopos mais amplos podem ser adotados; nestes casos, recomenda-se que os resultados relativos ao escopo mínimo sejam declarados separadamente, para permitir a comparação com análises que adotam apenas o escopo mínimo. Tal esforço é necessário para que, futuramente, sejam elaborados benchmarks de desempenho ambiental comparáveis.

7.5.1. Etapas do ciclo de vida (materiais cimentícios)

Para quantificar e comunicar as emissões de CO₂ incorporadas em materiais cimentícios, o escopo mínimo recomendado se refere ao estágio de produto, correspondente aos módulos A1 a A3 (berço ao portão). O indicador pode ser declarado de forma agregada (A1 a A3). Os demais módulos não são requeridos no escopo mínimo pelos seguintes motivos:

- As emissões de CO₂ decorrentes do transporte dos materiais até a obra (A4) variam conforme cada obra e, portanto, devem ser quantificadas caso a caso;
- As emissões de CO₂ decorrentes da instalação do material em obra (módulo A5) também dependem do contexto de cada obra e, portanto, devem ser quantificadas caso a caso;
- As emissões de CO₂ relacionadas ao estágio de uso (módulo B) dependem da aplicação de cada material, que varia conforme a obra e exigiria a definição de cenários com alto nível de incerteza. Além disso, para materiais cimentícios, essas emissões tendem a ser pequenas em comparação ao restante do seu ciclo de vida;
- As emissões de CO₂ decorrentes da disposição final dos resíduos ao fim da vida útil do produto (módulo C) ainda carecem de fatores de emissão de CO₂ representativos do contexto brasileiro (por exemplo, emissões de CO₂ associadas à operação dos diferentes tipos de aterro). Para materiais cimentícios, no entanto, essas emissões tendem a ser muito baixas comparadas ao restante do ciclo de vida.

Observa-se que o escopo mínimo recomendado para materiais está conforme a recomendação da ISO 21930 (norma internacional para DAPs de produtos de construção). Já a EN 15804 (norma europeia equivalente) e normas dela derivadas requerem como escopo mínimo os módulos A1 a A3, C e D; apesar disso, a norma europeia requer que os módulos A1 a A3 sejam declarados separadamente, o que permitiria o aproveitamento de dados disponíveis em EPDs produzidas de acordo com a EN 15804 para a avaliação do desempenho ambiental de produtos de construção e vice-versa.

7.5.2. Etapas do ciclo de vida (estruturas de concreto)

Para quantificar as emissões de CO₂ incorporadas em estruturas de concreto, o escopo mínimo também se refere ao estágio de produto (módulos A1 a A3, berço ao portão), sendo recomendado, caso haja dados disponíveis, que o escopo inclua também o estágio de construção (módulos A1 a A5, do berço à obra). É importante ressaltar que as etapas A1 a A3 incluem as emissões de CO₂ devidas à produção dos materiais necessários à construção da estrutura, considerando as quantidades especificadas em projeto, sem perdas. A inclusão da etapa de obra é recomendada principalmente para a comparar tecnologias que tenham

diferenças relevantes associadas aos processos construtivos. Por exemplo, uma estrutura pré-moldada de concreto tem índice de perda de material inferior ao de uma estrutura moldada in-loco, potencialmente reduzindo a contribuição do estágio A5 para as emissões de CO₂. Quanto aos demais estágios:

- O estágio de uso (módulo B) tende a apresentar emissões de CO₂ relativamente baixas para estruturas de concreto, cuja vida útil de projeto é igual à vida útil requerida do edifício e, portanto, ao período de referência da análise;
- O estágio de fim de vida (módulo C) não dispõe ainda de fatores de emissão de CO₂ representativos do contexto brasileiro para sua modelagem.

No entanto, para garantir a consistência dos indicadores, solicita-se que eles sejam declarados por módulo, sendo que os módulos A1 a A3 podem ser declarados de forma agregada. Assim, permite-se a comparação entre análises que reportem apenas os módulos A1 a A3 e aqueles que reportem os módulos A1 a A5.

O Quadro 2 sintetiza o escopo mínimo em termos das etapas do ciclo de vida de materiais cimentícios e estruturas de concreto.

Quadro 2 – Escopo mínimo de etapas do ciclo de vida para quantificação das emissões incorporadas de CO₂ em materiais cimentícios e estruturas de concreto.

Objeto de análise	Estágio de produto			Estágio do processo construtivo		Estágio de uso					Estágio de fim de vida				Benefícios e cargas além da fronteira do sistema
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
Material cimentício	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Estrutura de concreto	X	X	X	(X)	(X)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

X: obrigatório. (X): desejável.

7.5.3. Elementos construtivos (estruturas de concreto)

Para avaliar o desempenho ambiental de estruturas de concreto de edifícios, devem ser considerados, no mínimo, os seguintes elementos construtivos:

- Fundações;
- Contenções;
- Superestrutura (inclusive escadas e rampas);
- Cobertura.

Devem ser considerados os elementos construtivos que se encontram dentro do perímetro do terreno do empreendimento. No caso de empreendimentos imobiliários, além dos edifícios propriamente ditos (torres), devem ser incluídas áreas de estacionamento de veículos, áreas comuns (ex.: piscina), circulação interna de pedestres e veículos, edifícios auxiliares (ex.: guarita), entre outros.

Para facilitar a comparação das emissões de CO₂ incorporadas em estruturas e, conseqüentemente, o desenvolvimento de benchmarks de desempenho ambiental, recomenda-se que os indicadores sejam calculados separadamente para os edifícios (torres) e o restante do empreendimento (Figura 5). Além disso, recomenda-se separar o indicador referente à superestrutura do restante.

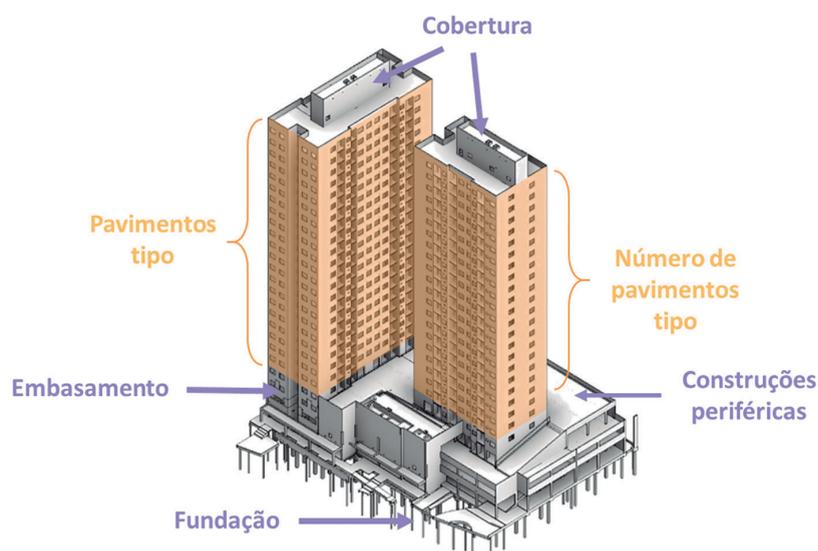


Figura 5 – Ilustração da divisão das partes de um empreendimento. Adaptado de [25].

8. Análise do Inventário

8.1. Coleta de dados

8.1.1. Orientações gerais

Para todo processo elementar, devem ser inventariadas as entradas e saídas necessárias para estimar as emissões de CO₂ associadas ao processo e, consequentemente, ao produto que ele origina. As categorias de entradas e saídas são as seguintes:

Entradas:

- **Recurso material:** material extraído diretamente da natureza e utilizado como matéria-prima no processo. Exemplos: calcário para produção de cimento, minério de ferro para produção de ferro gusa;
- **Material processado:** material proveniente de outros sistemas de produto, ou seja, de outros processos produtivos, utilizado como matéria-prima. Exemplos: cimento para a produção do concreto, ferro gusa para a produção de aço;
- **Eletricidade:** energia elétrica utilizada no conjunto de processos elementares que ocorrem dentro de uma instalação (fábrica ou canteiro de obras);
- **Combustível:** combustível utilizado como fonte de energia (térmica) no processo. Exemplos: coque de petróleo para a produção de clínquer, carvão para a produção de ferro gusa;

- **Água:** água utilizada no processo. Embora não seja necessária para o cálculo das emissões de CO₂, caso haja dados disponíveis, recomenda-se incluir o consumo de água no inventário, para possibilitar a verificação do balanço de massaⁱ.

Saídas:

- **Produto:** inclui o(s) produto(s) resultantes do processo elementar. Exemplo: cimentos no caso de uma fábrica de cimento, ferro gusa e escória de alto forno no processo de produção de ferro em alto forno, elementos pré-fabricados de concreto, estrutura de concreto;
- **Resíduo:** resíduo sólido gerado durante o processo, que não tem valor nem uso comercial e que, portanto, deve ser encaminhado à disposição final. Exemplo: resíduo de concreto gerado a partir do concreto devolvido pelas obras à usina de concreto. Caso o resíduo seja encaminhado para reciclagem, ele não é considerado um resíduo, mas sim um produto (coproduto), mesmo se ele não tiver valor comercial;
- **CO₂:** emissões de CO₂ decorrentes do uso de combustíveis que contenham carbono, de biomassa não renovável e/ou da decomposição de carbonatos;
- **Efluente líquido:** saída de água do processo. Essa informação não é necessária, a priori, para estimar as emissões de CO₂, mas seu inventário pode ser útil para fechar o balanço de massa do processo.

Para os produtos provenientes de ou destinados a outros sistemas de produto, também devem ser considerados os respectivos processos de transporte. Exemplos: transporte do coque de petróleo até a fábrica de cimento; transporte de cimento até a central de concreto; transporte de resíduos de concreto até o aterro de inertes.

Recomenda-se primeiramente mapear o processo analisado, listando todas as entradas e saídas do processo, separadas por categorias, como ilustra a Figura 1. Em um primeiro momento, esse mapeamento é feito do “portão ao portão”, ou seja, considerando apenas as entradas e saídas da fábrica ou da obra em questão. Após isso, identificam-se os demais sistemas de produto que precedem ou sucedem as entradas e saídas identificadas. É útil registrar este mapeamento na forma de fluxograma, como os apresentados na Figura 1 ou na Figura 2 como exemplo. O mapeamento deve ser coerente com o escopo e a fronteira do sistema definidos para a análise.

Uma vez feito o mapeamento, é necessário determinar as quantidades de cada entrada e saída do processo para elaborar o inventário de ciclo de vida do produto. Esta quantificação é feita em duas etapas: primeiramente, determinam-se as quantidades da forma mais apropriada para cada contexto (por exemplo, por mês) e, depois, calculam-se as quantidades relativas à unidade funcional ou declarada adotada. Neste caso, há orientações diferentes para materiais e estrutura, detalhadas a seguir. O Quadro 3 apresenta um modelo para o registro de dados de inventário de ciclo de vida.

ⁱ A soma da massa das entradas de um processo deve ser igual à soma da massa das saídas desse mesmo processo.

Quadro 3 – Modelo para coleta de dados de inventário de ciclo de vida.

Categoria	Entrada ou saída específica	Consumo ou produção		Transporte	
		Qtde.	Unid	Modo	Distância (km)
ENTRADAS					
Recurso material	Recurso material 1				
	Recurso material 2				
	Recurso material 3				
CO ₂ (absorção)	CO ₂				
Material processado	Material 1				
	Material 2				
	Material 3				
Eletricidade	Eletricidade fonte 1				
	Eletricidade fonte 2				
	Eletricidade fonte 3				
Combustível	Combustível 1				
	Combustível 2				
	Combustível 3				
Água	Água				
SAÍDAS					
Resíduo	Resíduo destino 1				
	Resíduo destino 2				
	Resíduo destino 3				
CO ₂ (emissão)	CO ₂				
Efluente	Efluente				
PRODUTOS					
Produto	Produto 1				
	Produto 2				
	Produto 3				

A seguir são apresentadas algumas recomendações gerais:

- Todos os dados que estejam sob controle da entidade responsável pelo material ou estrutura cujo desempenho ambiental está sendo analisado devem ser dados primários. Isso inclui todas as entradas e saídas diretas do processo de fabricação, no caso dos materiais, e todas as especificações de projeto e dados de obra, no caso das estruturas;
- Cada recurso material, material processado, combustível, produto e resíduo deve ser quantificado separadamente. Também devem ser diferenciadas as fontes de eletricidade, uma vez que o fator de emissão de CO₂ muda a depender da fonte;
- Caso o veículo que transporte insumos até o local de consumo (ou resíduos até o local de sua disposição final) retorne vazio ao local de origem, a distância de transporte deve ser multiplicada por 2¹. Deve-se considerar a distância de tráfego, não a distância em linha reta entre duas localidades;

¹ Embora o consumo de combustível do veículo vazio seja inferior ao do veículo cheio, realizar essa diferenciação traz complexidades adicionais para o cálculo com pouca alteração do resultado final. Considerar que os veículos estão sempre carregados resulta em uma estimativa conservadora e mais simples de ser calculada.

- As emissões de CO₂ normalmente são calculadas, e não medidasⁱ;
- Para verificar se o inventário está completo e se as quantidades estão corretas, recomenda-se analisar o balanço de massa, ou seja, se a soma da massa das entradas corresponde à massa das saídas;
- Em caso de dados faltantes, recomenda-se que as quantidades sejam determinadas com base em estimativas conservadoras, ou seja, que resultem em maiores emissões de CO₂. Desse modo, uma vez que se obtenham dados mais precisos, a pegada de CO₂ irá apenas diminuir.

8.1.2. Orientações para materiais cimentícios

Recomenda-se que a coleta de dados da fabricação de materiais cimentícios seja feita da forma mais próxima possível à forma como os dados são controlados em fábrica, para evitar erros devidos a conversões ou cálculos intermediários. Normalmente, isso equivale a coletar os dados mensais de consumo e produção da fábrica. As normas internacionais de DAP para produtos de construção recomendam que os dados sejam coletados, no mínimo, ao longo de 12 meses para compensar eventuais variações sazonais nos processos produtivos.

Normalmente, fábricas produzem mais de um tipo de material e não é possível coletar todos os dados de forma separada para cada produto. Por exemplo: no caso do concreto dosado em central, é possível obter dados específicos relativos à composição de cada concreto a partir da sua dosagem (traço), mas não é possível (nem necessário) coletar separadamente quantos kWh de energia elétrica foram consumidos na central para produzir um tipo específico de concreto. Nesse caso, pode-se obter o consumo mensal de energia elétrica da central (kWh) e dividi-lo pela quantidade total de concreto produzida no mesmo período (em m³), obtendo-se assim o consumo unitário de energia elétrica (em kWh/m³).

8.1.2. Orientações para estruturas de concreto

Para estruturas de concreto, os dados de consumo de material podem ser extraídos de quantitativos de projeto e/ou composições unitárias de serviço. Por exemplo, o projeto pode especificar o volume de concreto, a quantidade de aço e a área de parede de concreto (em m²), e a composição unitária da parede pode ser utilizada para obter o consumo de fôrmas, permitindo assim obter as quantidades de cada material para o inventário.

As quantidades de material devem ser diferenciadas por etapa do ciclo de vida. No estágio de produto (módulos A1 a A3), devem ser contabilizadas as quantidades de material correspondentes à especificação do projeto, sem perdas. As perdas devem ser contabilizadas no estágio do processo construtivo (módulo A5). Os índices de perdas podem ser estimados ou medidos em obra.

As perdas incluem tanto o desperdício de materiais que se transformam em resíduos e que, portanto, precisam ser encaminhados à disposição final; quanto perdas incorporadas. No segundo caso, a quantidade a mais de material que entra não se transforma imediatamente em resíduo e não deve ser declarada como tal. Para fins de balanço de massa, considera-se que essa massa adicional de material integra a massa do produto (estrutura).

O consumo de energia elétrica e combustíveis na obra deve ser contabilizado no módulo A5. No módulo A5 também deve ser declarado o consumo de material

ⁱ Em alguns processos industriais, os fabricantes possuem monitoramento de emissões atmosféricas, inclusive CO₂. Mesmo nestes casos, recomenda-se que a emissão de CO₂ seja baseada em cálculos com fatores de emissão. Os dados medidos de emissão de CO₂ podem eventualmente ser utilizados para verificação da consistência do cálculo.

referente às fôrmas e escoramentos utilizados na produção de estruturas de concreto moldadas *in-loco*.

Para as avaliações que forem além do escopo mínimo e incluïrem a etapa de uso da edificação, as quantidades referentes à substituição de materiais cuja vida útil seja inferior à da edificação (módulo B4) deve ser calculada levando em consideração o número de reposições estimado para cada material, como mostra a Equação 1. Se, após a última reposição agendada do produto, a vida útil remanescente da edificação for curta em relação à vida útil do produto que está sendo repostado, deve-se avaliar a probabilidade de que essa reposição efetivamente aconteça.

$$n_i = \left\lceil \frac{PR}{VU_i} \right\rceil - 1 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- n_i : número de reposições de um material “i”;
- PR : período de referência da avaliação (em anos), normalmente equivalente à vida útil de projeto (VUP) da edificação;
- VU_i : vida útil do material “i” (em anos).
- $\left\lceil \frac{PR}{VU_i} \right\rceil$: função que arredonda o resultado da divisão para o próximo número inteiro.

Os cenários de reposição devem considerar condições realistas de manutenção da edificação. Por exemplo, embora a vida útil requerida de revestimentos argamassados na ABNT NBR 15575-1 seja inferior à vida útil de projeto de um edifício, é improvável que a totalidade do revestimento de argamassa seja retirada e substituída por um novo revestimento – o mais provável é que sejam feitos reparos pontuais em uma parte da área de revestimento. Neste caso, não se deve simplesmente utilizar a Equação 1, que levaria a superestimar a quantidade de materiais consumida para manutenção. Em qualquer situação, as considerações feitas para estimativa das quantidades do inventário devem ser devidamente documentadas.

No caso da comparação de alternativas (materiais ou estruturas) com durabilidade diferente, deve-se adotar o mesmo período de referência para ambas as alternativas, diferenciando-as através da vida útil. Por exemplo, se um material “A” tem vida útil estimada de 10 anos em uma dada aplicação e um material “B” tem vida útil estimada de 20 anos para a mesma aplicação, para uma análise cujo período de referência seja de 40 anos, deverão ser consideradas 3 reposições do material “A” e 1 reposição do material “B” ao longo desse período.

8.2. Critérios de corte

Nem todas as entradas e saídas precisam ser consideradas na elaboração do inventário de ciclo de vida. De uma forma geral, as normas de ACV recomendam os seguintes critérios de corte:

- No caso de materiais ou resíduos, podem ser desconsiderados aqueles que contribuam individualmente com menos de 1% da massa total de entradas ou saídas do processo elementar, desde que a massa conjunta de itens desconsiderados não exceda 5% da massa total de entradas ou saídas do processo;
- No caso de fontes energéticas (eletricidade e combustíveis), podem ser desconsideradas aquelas que contribuam individualmente com menos de 1% do consumo energético total do processo, desde que a soma da energia correspondente

às fontes energéticas desconsideradas não exceda 5% do consumo energético total do processo.

Como esses critérios de corte costumam ser aplicados para os itens para os quais não se têm dados precisos (visando economizar tempo de coleta de dados para itens pouco significativos), a avaliação da contribuição individual/conjunta destes itens para enquadramento nos critérios de corte pode ser feita com base em estimativas conservadoras.

Deve-se tomar cuidado para não excluir itens que, mesmo que sejam pouco representativos em massa ou energia, tenham um fator de emissão de CO₂ alto e, portanto, possam contribuir com mais de 1% da pegada de CO₂ do material ou estrutura em análise. Também nesse caso, podem ser adotadas estimativas conservadoras para avaliar o enquadramento no critério de corte.

Deve-se documentar os critérios de corte adotados na análise e, se possível, listar quais entradas e saídas foram desconsideradas com base nesses critérios.

8.3. Procedimentos de cálculo e alocação

As entradas e saídas do inventário do ciclo de vida devem ser relativizadas para a unidade funcional ou declarada do material ou estrutura. Em alguns casos, os fluxos de inventário podem ser informados já na forma requerida; por exemplo, a dosagem de um concreto informa o consumo de materiais em kg/m³. Nas demais situações, o cálculo dos fluxos unitários de inventário deve ser feito conforme a Equação 2.

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{prod}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- q_i : quantidade unitária de um determinado item “i” (entrada ou saída) do inventário de ciclo de vida do produto (UD_i/UF);
- Q_i : quantidade total de um determinado item “i” (entrada ou saída) do inventário de ciclo de vida (UD_i);
- Q_{prod} : quantidade total do produto (UF).

Por exemplo, no caso de uma central de concreto que consuma 8000 kWh/mês de eletricidade e produza 4000 m³/mês de concreto, o consumo unitário de eletricidade seria igual a 2.0 kWh/m³ (supondo que não haja diferenças significativas de consumo de eletricidade para diferentes tipos de concreto). Neste exemplo, adotou-se (implicitamente) uma alocação do consumo de eletricidade proporcional ao volume de concreto produzido.

A alocação dos fluxos de inventário sempre é necessária em processos que produzam mais de um produto. De acordo com as normas de ACV, a alocação deve ser evitada sempre que possível, subdividindo o processo em subprocessos específicos. Quando não for possível evitar a alocação, a recomendação é que a subdivisão dos fluxos de inventário reflita ao máximo a realidade física do processo em questão. Um exemplo é a produção de blocos de concreto: o consumo de energia elétrica pode ser subdividido de forma proporcional à massa unitária de cada bloco, pois quanto maior a massa, maior o tempo de vibroprensagem; por outro lado, o consumo de pallets deve ser subdividido de forma proporcional à área transversal de cada bloco.

No entanto, em alguns casos de produção conjunta, a alocação proporcional às características físicas pode não fazer sentido, principalmente para produtos cujo preço unitário seja muito diferente. Um dos exemplos mais conhecidos é o da produção de ferro gusa e da escória de alto forno: o motivo da operação de um alto forno é a produção do ferro gusa e a escória é uma consequência inevitável desse processo. A alocação do consumo de combustível do alto forno proporcional às massas de ferro gusa e escória resultaria em um impacto ambiental relativamente alto para a escória, reduzindo (artificialmente) o impacto ambiental do ferro gusa. Nestes casos, a recomendação é adotar a alocação econômica, ou seja, proporcional à receita gerada por cada produto. As normas de ACV orientam que, quando a contribuição de diferentes produtos para a receita total do fabricante for superior a 25%, a alocação econômica deve ser considerada. Nos casos em que algum produto contribua com menos de 1% da receita do fabricante, pode-se não alocar nenhum fluxo de inventário e, conseqüentemente, nenhum impacto ambiental a ele. Não deve ser alocado nenhum fluxo de inventário aos resíduos gerados no processo (apenas produtos carregam impactos ambientais).

A Equação 3 apresenta o procedimento de cálculo para alocação dos fluxos de inventário entre produtos (vale tanto para alocação física quanto para alocação econômica).

$$q_{i,j} = \frac{Q_i}{Q_{prod,j}} \times \alpha_{prod,j} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- $q_{i,j}$: quantidade unitária de um determinado item “i” (entrada ou saída) do inventário de ciclo de vida do produto, alocada ao produto “j” (UD_i/UF_j);
- Q_i : quantidade total de um determinado item (entrada ou saída) do inventário de ciclo de vida (UD_i);
- $Q_{prod,j}$: quantidade total do produto “j” (UF_j);
- $\alpha_{prod,j}$: fator de alocação do produto “j” (%).

A soma das entradas e saídas alocadas deve ser igual à soma das entradas e saídas antes da alocação, como mostra a Equação 4.

$$Q_i = \sum_j (q_{i,j} \times Q_{prod,j}) \quad (\text{Equação 4})$$

Nos cálculos para unitarização e alocação dos fluxos de inventário, deve-se atentar para a consistência das unidades de medida. Recomenda-se que as conversões sejam sempre acompanhadas de análises dimensionais para evitar erros.

9. Cálculo dos indicadores

9.1. Emissão de CO₂

O cálculo da emissão de CO₂ incorporada em um produto (material ou estrutura) pode ser resumido como a multiplicação da quantidade unitarizada (e alocada) dos itens do inventário de ciclo de vida do produto pelos respectivos fatores de emissão de CO₂, como mostra a Equação 5.

$$c_j = \sum_i (q_{i,j} \times c_i) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

- C_j : emissão de CO₂ de um produto “j” (kg CO₂/UF_j);
- $q_{i,j}$: quantidade unitária do item “i” alocada ao produto “j” (UD_i/UF_j);
- c_i : fator de emissão de CO₂ do item “i” (kg CO₂/UD_i).

Para facilitar a apresentação dos cálculos, o índice “j” do produto será suprimido, partindo da premissa que os fluxos de inventário já estão alocados.

Os fatores de emissão de CO₂ se diferenciam entre (Equação 6):

Emissões diretas de CO₂ devidas a:

- Queima de combustíveis fósseis no sistema de produto (C_{comb});
- Decomposição de carbonatos no sistema de produtoⁱ (C_{calc});
- Queima ou decomposição de biomassa não renovável no sistema de produto ($C_{biomassa-nr}$).

Emissões indiretas de CO₂ devidas a:

- Emissões de CO₂ incorporadas aos materiais processados (C_{mat}) em função dos processos a montante necessários à fabricação destes materiais;
- Emissões de CO₂ incorporadas à energia elétrica (C_{ele}) em função dos processos a montante necessários à geração da eletricidade (conforme a fonte);
- Emissões de CO₂ associadas à disposição final dos resíduos (C_{res}), em função dos processos a jusante necessários para tal disposição;
- Emissões de CO₂ associadas ao transporte, seja de materiais, combustíveis ou resíduos (C_{tr}).

$$C = C_{comb} + C_{calc} + C_{biomassa-nr} + C_{mat} + C_{ele} + C_{res} + C_{tr} \quad (\text{Equação 6})$$

As emissões de CO₂ da queima de combustíveis fósseis podem ser estimadas conforme a Equação 7, utilizando os fatores de emissão apresentados na Tabela 2.

$$C_{comb} = q_{comb} \times c_{comb} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

- C_{comb} : emissão de CO₂ decorrente da queima de combustível fóssil (kg CO₂);
- q_{comb} : quantidade do combustível (unidade declarada do combustível – UD);
- c_{comb} : fator de emissão de CO₂ do combustível (kg CO₂/UD).

Tabela 2 – Fatores de emissão de CO₂ para combustíveis [26,27].

Combustível	Fator de emissão de CO ₂	Unidade
Álcool etílico hidratado	0 ^a	kg CO ₂ /L
Carvão mineral	2.26	kg CO ₂ /kg
Carvão vegetal não renovável ^b	3.03	kg CO ₂ /kg
Carvão vegetal renovável	0 ^a	kg CO ₂ /kg
Coque de carvão mineral	2.73	kg CO ₂ /kg

ⁱ Relevantes apenas para a fabricação de cal e cimento.

Combustível	Fator de emissão de CO ₂	Unidade
Coque de petróleo	3.42	kg CO ₂ /kg
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	2.93	kg CO ₂ /kg
Gás natural	2.33	kg CO ₂ /m ³
Gasolina automotiva	1.63	kg CO ₂ /L
Lenha não renovável ^b	566	kg CO ₂ /st ^c
Lenha renovável	0 ^a	kg CO ₂ /st ^c
Óleo combustível	3.11	kg CO ₂ /L
Óleo diesel	2.29	kg CO ₂ /L
Resíduo de madeira renovável	0 ^a	kg CO ₂ /kg
Resíduo de óleo	3.11	kg CO ₂ /kg
Resíduo de pneu	3.14	kg CO ₂ /kg
Resíduo plástico	1.98	kg CO ₂ /kg

^a Estes combustíveis apresentam emissões de CO₂ iguais a zero pois são constituídos de biomassa renovável.

^b Considera-se não renovável toda biomassa proveniente de desmatamento. Caso a origem da madeira não possa ser comprovada, deve-se admitir a possibilidade de que seja proveniente de desmatamento.

^c st = metro cúbico estéreo.

As emissões de CO₂ decorrentes da decomposição de carbonatos podem ser calculadas conforme a Equação 8, utilizando os fatores de emissão que constam da Tabela 3.

$$C_{calc} = q_{calc} \times c_{calc} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

- C_{calc} : emissão de CO₂ decorrente da calcinação (kg CO₂);
- q_{calc} : quantidade do carbonato (kg);
- c_{calc} : fator de emissão de CO₂ da calcinação do carbonato (em kg CO₂/kg).

Tabela 3 – Fatores de emissão de CO₂ para a calcinação de carbonatos, considerando 100% de calcinação [28].

Fórmula molecular	Nome do mineral	Fator de emissão de CO ₂ (kg CO ₂ /kg carbonato)
CaCO ₃	Calcita	0.44
MgCO ₃	Magnesita	0.52
CaMg(CO ₃) ₂	Dolomita	0.48
FeCO ₃	Siderita	0.38
Ca(Fe,Mg,Mn)(CO ₃) ₂	Ankerita	0.41-0.48
MnCO ₂	Rodocrosita	0.38
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio	0.41

As emissões de CO₂ devidas à queima ou decomposição aeróbicaⁱ de biomassa não renovávelⁱⁱ (por exemplo, madeira de desmatamento) podem ser calculadas de acordo com a Equação 9.

$$C_{biomassa} = q_{biomassa\ seca} \times 0.5 \times 44/12 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

- $C_{biomassa}$: emissão de CO₂ decorrente da queima ou decomposição de biomassa (kg CO₂);
- $q_{biomassa\ seca}$: quantidade de biomassa seca (em kg);
- 0.5: 50% da biomassa seca é carbono;
- 44/12: relação entre a massa molecular do CO₂ (44) e a massa atômica do carbono (12).

Para os materiais, eletricidade e resíduos, vale a Equação 5; ou seja, a multiplicação da quantidade unitária desses itens pelos respectivos fatores de emissão de CO₂ referentes aos seus sistemas de produto.

Para as emissões relacionadas ao transporte, deve-se adotar a Equação 10.

$$C_{tr} = \sum_i \left(q_i \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

- C_{tr} : emissões de CO₂ associadas ao transporte das entradas e saídas do inventário (kg CO₂/UF);
- q_i : quantidade unitária do item “i” a ser transportado (UD_i/UF);
- m_i : fator de conversão em massa do item “i” (kg/UD_i);
- $d_{tr,i}$: distância de transporte do item “i” (km);
- $c_{tr,i}$: fator de emissão de CO₂ do modo de transporte adotado para o item “i” (kg CO₂/(t.km)).

As quantidades unitárias e distâncias de transporte são extraídas do inventário de ciclo de vida. A seguir, são detalhadas as possíveis fontes para os fatores de emissão de CO₂.

9.1.1. Fatores de emissão de CO₂

Existem basicamente dois tipos de dados para os fatores de emissão de CO₂: dados genéricos, que não dizem respeito a um fabricante determinado; e dados específicos, que dizem respeito a um fabricante ou produtor específico. Dados genéricos usualmente estão disponíveis em bases de dados de produtos de construção. No Brasil, o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidacⁱⁱⁱ) disponibiliza fatores de emissão de CO₂ genéricos para os principais materiais de construção. Dados específicos, por sua vez, são veiculados por meio de DAPs pelos respectivos fabricantes. A decisão sobre qual dado usar depende do contexto de cada avaliação de desempenho ambiental e do tipo de processo que está sendo modelado, conforme mostra o Quadro 4.

ⁱ No caso da decomposição anaeróbica, há a formação de metano (CH₄) e não de CO₂; e a equação apresentada não se aplica.

ⁱⁱ As emissões de CO₂ provenientes de biomassa não renovável são consideradas equivalentes a emissões fósseis pois contribuem para o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera.

ⁱⁱⁱ Acessível em www.sidac.org.br

Quadro 4 – Tipos de dados para os fatores de emissão de CO₂, conforme o tipo de processo.

Tipo de processo	Tipo de dados	
	Genéricos	Específicos (DAPs)
Processos de primeiro plano (<i>foreground</i>) • Produção de materiais processados (c_{mat})	X	X
Processos de segundo plano (<i>background</i>) • Geração de energia elétrica da rede (c_{ele}) • Processos de transporte (c_{tr}) • Disposição de resíduos (c_{res})	X	(X)
Reações químicas • Queima de combustíveis fósseis (c_{comb}) • Decomposição de carbonatos (c_{calc}) • Queima/decomposição de biomassa não renovável ($c_{biomassa-nr}$)	X	(X)

Legenda: X aplicável, (X) possível

Os fatores de emissão de CO₂ dos materiais processados (c_{mat}) podem ser genéricos ou específicos. No caso de fatores genéricos, idealmente estes devem considerar a variação das emissões de CO₂ entre fabricantes de um mesmo produto, que costuma ser alta para produtos de construção – em alguns casos, a pegada de CO₂ pode mais do que dobrar entre o fabricante com melhor e pior desempenho ambiental, para o mesmo produto [29]. Por outro lado, dados específicos, por dizerem respeito a um único fabricante, não têm variação da pegada de CO₂, exceto se estes dados considerarem dados genéricos como dados de entrada para o cálculo de suas emissões de CO₂ (neste caso, eles carregam a incerteza dos dados a montante).

Quando o fornecedor de um determinado material ainda não tiver sido escolhido (ou quando não houver dado específico disponível), devem ser utilizados dados genéricos para o fator de emissão de CO₂ deste material (vide item 9.3 sobre a consideração de incertezas). Na medida em que as definições avançam, devem ser utilizados dados específicos sempre que possível.

No caso de processos provenientes de setores que abastecem toda a economia, como a geração de energia elétrica da rede pública (c_{ele}), as operações de transporte (c_{tr}) e os processos de tratamento e disposição final de resíduos (c_{res}), recomenda-se também o uso de dados genéricosⁱ. Neste caso, a consideração das incertezas não é obrigatória pois não agrega valor relevante para a tomada de decisão; por exemplo, o consumidor não tem o poder de interferir na pegada de CO₂ da eletricidade da rede pública. Entretanto, em determinadas situações, podem ser utilizados dados específicos como, por exemplo, o fator de emissão de CO₂ de eletricidade adquirida no Mercado Livre de Energia com fontes incentivadas (a pegada de CO₂ tende a ser inferior à da eletricidade da rede). Para isso, no entanto, tais dados específicos precisam estar disponíveis.

Para fatores de emissão relacionados a reações químicasⁱⁱ – combustão, decomposição de carbonatos e decomposição de biomassa não renovável – também se recomenda o uso de dados genéricos, que são baseados em fatores de emissão públicos e consolidados, como os que constam da Tabela 2 e Tabela 3 (IPCC). Entretanto, também é possível utilizar fatores específicos; por exemplo, a partir da determinação em laboratório da composição química do combustível utilizado

ⁱ O Sidac dispõe de dados genéricos para energia elétrica e transportes.

ⁱⁱ O Sidac dispõe de dados genéricos para combustão e decomposição de biomassa.

em um processo industrial, ou da composição química de um mineral contendo carbonatos que passará por calcinação.

É importante avaliar a qualidade dos dados de fatores de emissão de CO₂ previamente ao seu uso. Os dados devem ser consistentes, ou seja, seguir as mesmas premissas de cálculo de emissões de CO₂ que as citadas neste Boletim Técnico. Além disso, os dados devem ser atuais, devendo-se evitar o uso de dados com mais de cinco anos desde sua data de publicação.

No caso de dados extraídos de DAPs, devem ser observadas as seguintes recomendações:

- Os fatores de emissão se referem às etapas A1 a A3 (estágio de produto);
- As DAPs normalmente comunicam o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* – GWP), que considera os diferentes gases de efeito estufa e não apenas o CO₂. Algumas comunicam três subdivisões do GWP:
 - GWP fóssil: potencial de aquecimento global devido à queima de combustíveis fósseis e a emissões de processo (inclusive calcinação);
 - GWP LULUCF (*Land Use, Land Use Change and Forestry*): potencial de aquecimento global devido ao uso do solo, à mudança do uso do solo e a atividades de exploração florestalⁱ;
 - GWP biogênico: potencial de aquecimento global relativo a emissões ou remoções de CO₂ biogênico.

O indicador que mais se aproxima da emissão de CO₂ tal qual descrita neste documento é o GWP fóssil, cuja unidade de medida é kg CO₂ equivalente. Caso se opte por utilizar dados de DAP e o fabricante não tenha como informar apenas as emissões de CO₂, recomenda-se adotar o GWP fóssil como sendo igual às emissões de CO₂ (ou seja, kg CO₂ equivalente = kg CO₂). Trata-se de uma estimativa conservadora, uma vez que o GWP fóssil sempre será igual ou maior do que apenas a emissão de CO₂; entretanto, a adoção de um fator único de correção poderia levar a imprecisões maiores.

9.1.2. Remoções de CO₂

Ao longo do ciclo de vida de produtos cimentícios e estruturas de concreto, também podem ocorrer remoções de CO₂; por exemplo, através da carbonatação (natural ou forçada) de materiais cimentícios. Considerando que tal remoção se dá em caráter praticamente permanente, a quantidade de CO₂ absorvida por carbonatação (C_{carb}) pode ser subtraída das emissões totais de CO₂, conforme Equação 11.

$$C' = C - C_{carb} \quad (\text{Equação 11})$$

No caso da carbonatação natural, é necessário quantificar a quantidade de CO₂ absorvida diretamente da atmosfera. No caso de carbonatação forçada utilizando CO₂ industrial, o CO₂ deve ser considerado como material (entrada), que também terá um fator de emissão de CO₂ associado a ele, considerando o consumo de materiais e energia decorrentes dos processo de captura e transporte do CO₂, bem como sua origem (se fóssil, biogênica ou diretamente capturado da atmosfera).

ⁱ Tais atividades podem alterar a quantidade de carbono estocada em uma determinada área de cobertura vegetal; por exemplo, o desmatamento de uma floresta nativa transforma o carbono que nela estava estocado em CO₂ liberado pela atmosfera pela decomposição da biomassa.

O cálculo da quantidade de CO₂ absorvida por carbonatação requer a consideração de condições específicas de cada processo, tais como a composição química do material, a difusão de ar pelo material, a concentração de CO₂, entre outros. A orientação sobre como realizar tal cálculo foge ao escopo do presente Boletim Técnico. Entretanto, uma vez estimada a quantidade de carbono absorvida, tal quantidade pode ser deduzida das emissões de CO₂ no ciclo de vida, conforme explicado anteriormente.

Este documento não considera a compensação de emissões de carbono (*carbon offset*), uma vez que atividades de compensação (por exemplo, reflorestamento) ocorrem fora do sistema de produto em análise. Trata-se de uma orientação também adotada por normas de ACV em geral.

9.1.3. Desdobramento por estágio do ciclo de vida

O indicador de emissão de CO₂ deve ser desdobrado por etapa do ciclo de vida do produto ou do edifício. A seguir, são descritas as orientações referentes a cada estágio do ciclo de vida. Por uma questão de simplicidade, não são apresentadas as remoções de CO₂ nas equações; entretanto, as mesmas devem ser alocadas às etapas do ciclo de vida em que ocorrem, seguindo a mesma lógica.

9.1.3.1. Estágio de produto (A1-A3)

Normalmente, o estágio de produto é declarado de forma conjunta (módulos A1, A2 e A3 somados). Sob a perspectiva de um fabricante de material de construção, a emissão de CO₂ referente ao estágio de produto pode ser calculada de acordo com as equações a seguir.

$$C_{A1-A3} = C_{mat,A1-A3} + C_{tr,A1-A3} + C_{ele,A3} + C_{comb,A3} + C_{calc,A3} + C_{tr,res,A1A3} + C_{res,A1-A3} \quad (\text{Equação 12})$$

$$C_{mat,A1-A3} = \sum_i (q_{mat,i,A3} \times c_{mat,i,A1}) \quad (\text{Equação 13})$$

$$C_{tr,A1-A3} = \sum_i \left(q_{i,A3} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 14})$$

$$C_{ele,A3} = q_{ele,A3} \times c_{ele,A1} \quad (\text{Equação 15})$$

$$C_{comb,A3} = \sum_i (q_{comb,i,A3} \times c_{comb,i}) \quad (\text{Equação 16})$$

$$C_{calc,A3} = \sum_i (q_{calc,i,A3} \times c_{calc,i}) \quad (\text{Equação 17})$$

$$C_{tr,res,A1-A3} = \sum_i \left(q_{res,i,A3} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 18})$$

$$C_{res,A1-A3} = \sum_i (q_{res,i,A3} \times c_{res,i,C3-C4}) \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

- C_{A1-A3} : emissão de CO₂ do estágio de produto (kg CO₂/UF);
- $C_{mat,A1-A3}$: emissão de CO₂ do estágio de produto devida aos materiais processados (kg CO₂/UF);

- $q_{mat,i,A3}$: quantidade do material processado “i” consumida no processo de fabricação, incluindo perdas do processo de fabricação (UD_i/UF);
 - $c_{mat,i,A1}$: fator de emissão de CO_2 do material processado “i” referente à sua produção ($A1^i$) ($kg\ CO_2/UD_i$).
- $C_{tr,A1-A3}$: emissão de CO_2 do estágio de produto devida ao transporte de todos os insumos ($kg\ CO_2/UF$):
- $q_{i,A3}$: quantidade do insumo transportado “i” consumida no processo de fabricação, incluindo perdas do processo de fabricação (UD_i/UF);
 - m_i : fator de conversão em massa do item “i” (kg/UD_i);
 - $d_{tr,i}$: distância de transporte do item “i” (km);
 - $c_{tr,i}$: fator de emissão de CO_2 do modo de transporte adotado para o item “i” ($kg\ CO_2/(t.km)$).
- $C_{ele,A3}$: emissão de CO_2 da etapa de fabricação devida à geração externa de energia elétrica ($kg\ CO_2/UF$):
- $q_{ele,A3}$: quantidade de energia elétrica consumida no processo de fabricação (kWh/UF ou UD);
 - $c_{ele,A1}$: fator de emissão de CO_2 da energia elétrica gerada externamente ($kg\ CO_2/kWh$).
- $C_{comb,A3}$: emissão de CO_2 da etapa de fabricação devida aos combustíveis utilizados no processo ($kg\ CO_2/UF$):
- $q_{comb,i,A3}$: quantidade do combustível “i” consumida no processo de fabricação (UD_i/UF);
 - $c_{comb,i}$: fator de emissão de CO_2 do combustível “i” ($kg\ CO_2/UD_i$).
- $C_{calc,A3}$: emissão de CO_2 da etapa de fabricação devida à calcinação no processo ($kg\ CO_2/UF$):
- $q_{calc,i,A3}$: quantidade do carbonato “i” consumida e decomposta no processo de fabricação (UD_i/UF);
 - $c_{calc,i}$: fator de emissão de CO_2 da calcinação do carbonato “i” ($kg\ CO_2/UD_i$).
- $C_{tr,res,A1-A3}$: emissão de CO_2 associada ao transporte dos resíduos gerados no processo de fabricação até seu local de disposição final ($kg\ CO_2/UF$):
- $q_{res,i,A3}$: quantidade do resíduo “i” gerada no processo de fabricação (UD_i/UF);
 - $d_{tr,i}$: distância de transporte do resíduo “i” até seu local de destinação (km).
- $C_{res,A1-A3}$: emissão de CO_2 do estágio de produto devida à disposição dos resíduos gerados no processo de fabricação ($kg\ CO_2/UF$);

ⁱ Etapa A1 na perspectiva do fabricante de um produto de construção que consome o material processado no seu processo de produção; na perspectiva do fornecedor do material processado, seriam as etapas A1-A3.

- $c_{res,i,C3-C4}$: fator de emissão de CO₂ referente à preparação para reciclagem ou disposição final do resíduo “i” (kg CO₂/UD_i)ⁱ.

O Anexo A apresenta como efetuar o cálculo para os módulos A1, A2 e A3 separadamente.

Para estruturas, o cálculo é mais simples, pois o estágio de produto diz respeito apenas à produção dos materiais necessários à construção da edificação, sem considerar eventuais perdas que ocorram durante a obra.

$$C_{A1-A3} = C_{mat} = \sum_i (q'_{mat,i} \times c_{mat,i,A1-A3}) \tag{Equação 20}$$

Onde:

- $C_{A1-A3} = C_{mat}$: emissão de CO₂ da estrutura referente à produção dos materiais de construção (kg CO₂/UF);
 - $q'_{mat,i}$: quantidade do material processado “i” consumida na estrutura, **sem** perdas, ou seja, conforme especificação de projeto (UD_i/UF);
 - $c_{mat,i,A1-A3}$: fator de emissão de CO₂ do material processado, do berço ao portão da fábrica (kg CO₂/UD_i).

9.1.3.2. Estágio do processo construtivo (A4-A5)

Para estruturas, o estágio do processo construtivo é declarado separadamente nas etapas A4 (transporte dos insumos até a obra) e A5 (construção). As emissões de CO₂ relacionadas ao transporte dos insumos até a obra pode ser calculada de acordo com a equação a seguir:

$$C_{A4} = C_{tr} = \sum_i \left(q'_i \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \tag{Equação 21}$$

Onde:

- $C_{A4} = C_{tr}$: emissão de CO₂ da estrutura referente ao transporte dos insumos até o canteiro de obras (kg CO₂/UF);
 - q'_i : quantidade do insumo transportado “i” consumida na obra, **sem** perdas (UD_i/UF). Pode ser aproximada por $q'_{i,mat}$ ⁱⁱ;
 - m_i : fator de conversão em massa do item “i” (kg/UD_i);
 - $d_{tr,i}$: distância de transporte do item “i” (km);
 - $c_{tr,i}$: fator de emissão de CO₂ do modo de transporte adotado para o item “i” (kg CO₂/(t.km)).

$$C_{A5} = C_{ele,A5} + C_{comb,A5} + C_{perdas,A5} \tag{Equação 22}$$

$$C_{ele,A5} = q_{ele,A5} \times C_{ele,A1} \tag{Equação 23}$$

ⁱ Neste momento, a maior parte dos fatores de emissão de CO₂ para a disposição final de resíduos no Sidac é igual a zero, não porque esses processos não tenham emissões associadas (por exemplo, maquinário utilizado na operação de aterros de inertes), mas sim porque os processos existentes no Sidac dizem respeito apenas à decomposição do resíduo propriamente dito (resíduos inertes não emitem CO₂ em sua decomposição). O único fator não nulo se refere à decomposição da biomassa não renovável.

ⁱⁱ Normalmente, para edifícios, não há consumo direto de recursos materiais (extraídos diretamente da natureza) e o transporte de combustíveis (por exemplo, utilizados no maquinário da obra) e de equipamentos tende a apresentar um impacto pequeno em relação ao transporte dos materiais de construção, de modo que $q'_i = q'_{i,mat}$.

$$C_{comb,A5} = \sum_i (q_{comb,i,A5} \times c_{comb,i}) \quad (\text{Equação 24})$$

$$C_{perdas,A5} = C_{A5,A1-A3} + C_{A5,A4} + C_{A5,C2} + C_{A5,C3-C4} \quad (\text{Equação 25})$$

$$C_{A5,A1-A3} = \sum_i (q''_{mat,i,A5} \times c_{mat,i,A1-A3}) \quad (\text{Equação 26})$$

$$C_{A5,A4} = \sum_i \left(q''_{mat,i,A5} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 27})$$

$$C_{A5,C2} = \sum_i \left(q_{res,i,A5} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 28})$$

$$C_{A5,C3-C4} = \sum_i (q_{res,i,A5} \times c_{res,i,C3-C4}) \quad (\text{Equação 29})$$

Onde:

- C_{A5} : emissão de CO₂ da estrutura referente ao processo construtivo (kg CO₂/UF);
- $C_{ele,A5}$: emissão de CO₂ referente ao consumo de energia elétrica no processo construtivo (kg CO₂/UF):
 - $q_{ele,A5}$: quantidade de energia elétrica consumida no processo construtivo (kWh/UF);
 - $c_{ele,A1}$: fator de emissão de CO₂ da energia elétrica (kg CO₂/kWh).
- $C_{comb,A5}$: emissão de CO₂ associada aos combustíveis utilizados no processo construtivo (kg CO₂/UF):
 - $q_{comb,i,A5}$: quantidade do combustível “i” consumida no processo construtivo (UD_i/UF);
 - $c_{comb,i}$: fator de emissão de CO₂ do combustível “i” (kg CO₂/UD_i).
- $C_{perdas,A5}$: emissão de CO₂ associada às perdas de material no processo construtivo (kg CO₂/UF);
- $C_{A5,A1-A3}$: emissão de CO₂ associada à fabricação dos materiais desperdiçados no processo construtivo (kg CO₂/UF):
 - $q''_{mat,i,A5}$: quantidade unitária do material processado “i” desperdiçada no processo construtivo (UD_i/UF);
 - $c_{mat,i,A1-A3}$: fator de emissão de CO₂ do material processado, do berço ao portão da fábrica (kg CO₂/UD_i).
- $C_{A5,A4}$: emissão de CO₂ associada ao transporte dos materiais desperdiçados no processo construtivo (kg CO₂/UF);
- $C_{A5,C2}$: emissão de CO₂ associada ao transporte dos resíduos decorrentes de materiais desperdiçados no processo construtivo até seu local de disposição final (kg CO₂/UF);

- $q_{res,i,A5}$: quantidade unitária do resíduo “i” gerada no processo construtivo (UD_i/UF);
 - $d_{tr,i}$: distância de transporte do resíduo “i” até seu local de destinação (km).
- $C_{A5,C3-C4}$: emissão de CO₂ associada ao processamento para reciclagem e/ou disposição final dos resíduos decorrentes de materiais desperdiçados no processo construtivo (kg CO₂/UF);
- $c_{res,i,C3-C4}$: fator de emissão de CO₂ referente à disposição do resíduo “i” (kg CO₂/UD_i)ⁱ.

9.1.3.3. Estágio de uso (B1-B5)

Embora não faça parte do escopo mínimo, a seguir, são dadas orientações sobre como calcular os indicadores referentes à etapa B4 (substituição de produtos com vida útil inferior ao período de referência da análise).

$$C_{B4} = C_{B4,A1-A3} + C_{B4,A4} + C_{B4,C2} + C_{B4,C3-C4} \quad (\text{Equação 30})$$

$$C_{B4,A1-A3} = \sum_i (q_{mat,i,B4} \times c_{mat,i,A1-A3}) \quad (\text{Equação 31})$$

$$C_{B4,A4} = \sum_i \left(q_{mat,i,B4} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 32})$$

$$C_{B4,C2} = \sum_i \left(q_{res,i,B4} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 33})$$

$$C_{B4,C3-C4} = \sum_i (q_{res,i,B4} \times c_{res,i,C3-C4}) \quad (\text{Equação 34})$$

Onde:

- C_{B4} : emissão de CO₂ da estrutura referente à substituição de materiais cuja vida útil é inferior ao período de referência, em relação à unidade funcional (kg CO₂/UF);
- $C_{B4,A1-A3}$: emissão de CO₂ da estrutura referente à produção dos novos materiais necessários para as substituições ao longo do ciclo de vida (kg CO₂/UF);
 - $q_{mat,i,B4}$: quantidade do material processado “i” para substituição, incluindo eventuais perdas (UD_i/UF).
- $C_{B4,A4}$: emissão de CO₂ da estrutura referente ao transporte dos materiais necessários para as substituições ao longo do ciclo de vida (kg CO₂/UF);
- $C_{B4,C2}$: emissão de CO₂ da estrutura referente ao transporte dos resíduos sólidos gerados nas substituições ao longo do ciclo de vida, até sua respectiva destinação final (kg CO₂/UF);

ⁱ Neste momento, a maior parte dos fatores de emissão de CO₂ para a disposição final de resíduos no Sidac é igual a zero, não porque esses processos não tenham emissões associadas (por exemplo, maquinário utilizado na operação de aterros de inertes), mas sim porque os processos existentes no Sidac dizem respeito apenas à decomposição do resíduo propriamente dito (resíduos inertes não emitem CO₂ em sua decomposição). O único fator não nulo se refere à decomposição da biomassa não renovável.

- $q_{res,i,B4}$: quantidade do resíduo sólido “i” gerada no processo de substituição (UD_i/UF).
- $C_{B4,C3-C4}$: emissão de CO_2 da estrutura referente à disposição final dos resíduos sólidos gerados nas substituições ao longo do ciclo de vida ($kg CO_2/UF$).

As demais variáveis são conforme as definições dos itens anteriores.

A quantidade de cada material “i” que será necessária para as operações de substituição ao longo do período de referência pode ser calculada de acordo com a Equação 1, ou de alguma outra forma que leve a uma estimativa razoável e coerente com a realidade.

A rigor, a etapa de substituição pode ter emissões de CO_2 decorrentes do “processo construtivo” associado à substituição – como se fosse um módulo A5 dentro do módulo B4 – por exemplo, o consumo de energia elétrica de um rompedor. Entretanto, normalmente as emissões de CO_2 decorrentes dessas atividades são irrisórias em comparação ao restante do ciclo de vida e, por isso, não foram detalhadas aqui.

9.1.3.4. Estágio de fim de vida (C1-C4)

Embora também não faça parte do escopo mínimo, a seguir, são dadas orientações sobre como calcular os indicadores referentes às etapas C1, C2, C3 e C4.

$$C_{C1} = C_{ele,C1} + C_{comb,C1} \quad (\text{Equação 35})$$

$$C_{ele,C1} = q_{ele,C1} \times c_{ele,A1} \quad (\text{Equação 36})$$

$$C_{comb,C1} = \sum_i (q_{comb,i,C1} \times c_{comb,i}) \quad (\text{Equação 37})$$

$$C_{C2} = \sum_i \left(q_{res,i,C3-C4} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 38})$$

$$C_{C3} = \sum_i (q_{res,i,C3} \times c_{res,i,C3}) \quad (\text{Equação 39})$$

$$C_{C4} = \sum_i (q_{res,i,C4} \times c_{res,i,C4}) \quad (\text{Equação 40})$$

Onde:

- C_{C1} : emissão de CO_2 referente ao processo de desconstrução/demolição da estrutura ($kg CO_2/UF$);
- $C_{ele,C1}$: emissão de CO_2 devida ao consumo de energia elétrica pelos equipamentos utilizados na etapa de demolição da estrutura ($kg CO_2/UF$);
 - $q_{ele,C1}$: quantidade de energia elétrica consumida no processo de demolição (kWh/UF).
- $C_{comb,C1}$: emissão de CO_2 devida ao consumo de combustível pelos equipamentos utilizados na etapa de demolição da estrutura ($kg CO_2/UF$);

- $q_{comb,i,C1}$: quantidade do combustível “i” consumida no processo de demolição (UD_i/UF);
- C_{C2} : emissão de CO₂ referente ao transporte dos resíduos de demolição até sua destinação (kg CO₂/UF);
 - $q_{res,i,C3-C4}$: quantidade do resíduo sólido “i” gerada no processo de desconstrução/demolição (UD_i/UF);
- C_{C3} : emissão de CO₂ referente ao processamento dos resíduos sólidos gerados na demolição da estrutura, antes de sua destinação ao reuso/reciclagem ou aterro (kg CO₂/UF);
 - $q_{res,i,C3}$: quantidade do resíduo sólido “i” destinada ao processamento para reuso/reciclagem (UD_i/UF);
 - $c_{res,i,C3}$: fator de emissão de CO₂ relativo ao processamento dos resíduos sólidos para reuso/reciclagem (kg CO₂/UD_i)ⁱ;
- C_{C4} : emissão de CO₂ referente ao processo de disposição final dos resíduos gerados da demolição da estrutura (kg CO₂/UF);
- $cr_{res,i,C4}$: fator de emissão de CO₂ relativo ao processo de disposição final dos resíduos gerados na demolição (kg CO₂/UD_i).

As demais variáveis são conforme as definições dos itens anteriores.

9.1.4. Consideração de incertezas

Os fatores utilizados no cálculo da emissão de CO₂ podem ter incertezas. Por exemplo, a quantidade de um material pode estar sujeita à variação dependendo do índice de perdas em obra, que pode ser estimado durante a etapa de projeto, mas só será conhecido após o término da obra e sua aferição. Outro exemplo é o fator de emissão de CO₂ de um produto quando ainda não se conhece o seu fornecedor, ou quando não se dispõe de DAPs para o produto em questão, sendo necessário o uso de dados genéricos. Sendo assim, recomenda-se que o cálculo da emissão de CO₂ leve em consideração as incertezas.

A forma mais simples de considerar as incertezas é calcular a faixa de valores, considerando a variação máxima de cada parâmetro do cálculo, conforme mostram as equações a seguir.

$$C_{min} = \sum_i (q_{i,min} \times c_{i,min}) \quad (\text{Equação 41})$$

$$C_{max} = \sum_i (q_{i,max} \times c_{i,max}) \quad (\text{Equação 42})$$

Onde:

- C_{min} : emissão de CO₂ mínima de um material ou estrutura (kg CO₂/UF);
- $q_{i,min}$: quantidade mínima do item “i” (UD_i/UF);
- $c_{i,min}$: fator de emissão de CO₂ mínimo do item “i” (kg CO₂/UD_i);
- C_{max} : emissão de CO₂ máxima de um material ou estrutura (kg CO₂/UF);

ⁱ Neste momento, o Sidac não dispõe de fatores de emissão de CO₂ para processamento de resíduos para reuso/reciclagem.

- $q_{i,max}$: quantidade máxima do item “i” (UD_i/UF);
- $c_{i,max}$: fator de emissão de CO₂ máximo do item “i” (kg CO₂/UD_i).

Caso se utilizem dados específicos, não é obrigatório considerar a incerteza do fator de emissão, ainda que este possa ser afetado por fontes de incerteza a montante.

O procedimento descrito anteriormente implica a realização de pelo menos dois cálculos para o produto ou edifício em questão. Caso, por razões práticas, isso não seja possível, recomenda-se que o cálculo seja feito com os valores máximos de quantidades e fatores de emissão, de modo a se ter uma estimativa conservadora da emissão de CO₂. Deste modo, eventuais refinamentos tenderão a reduzir, e não a aumentar, o indicador de emissão de CO₂. A vantagem de realizar o cálculo também do valor mínimo, no entanto, é que ele demonstra o potencial de mitigação existente, por exemplo, através da seleção de fornecedores com menor pegada de CO₂.

Embora seja prática comum na ACV realizar cálculos de indicadores de desempenho ambiental sem consideração de incertezas, mesmo quando se utilizam dados genéricos para os fatores de emissão dos insumos, é importante observar que dificilmente os valores divulgados para esses fatores de emissão são valores médios de fato. O cálculo de um fator de emissão médio (ou mediano) requer uma amostra estatisticamente representativa da população que se quer representar; por exemplo, o valor médio brasileiro para a emissão de CO₂ de um determinado tipo de bloco de concreto exigiria a coleta de dados de uma quantidade estatisticamente representativa de fabricantes deste tipo de bloco em escala nacional. Como os dados genéricos disponíveis atualmente, tanto nacional quanto internacionalmente, não são baseados em amostras estatisticamente representativas, recomenda-se a consideração das incertezas conforme orientações apresentadas neste item.

O Anexo B descreve outras formas de propagação de incertezas para o cálculo das emissões de CO₂.

9.2. Consumo de material (estruturas)

Além do indicador de emissão de CO₂, recomenda-se que seja calculado o indicador de consumo de material para estruturas. A análise conjunta dos dois indicadores permite avaliar a consistência dos resultados, além de criar valores de referência para subsidiar decisões voltadas à desmaterialização de estruturas. O consumo de material pode ser calculado de acordo com a Equação 43.

$$M = \sum_i (q'_i \times m_i) \quad (\text{Equação 43})$$

Onde:

- M : consumo de material de uma estrutura (kg/UF);
- q'_i : quantidade unitária do item “i” (UD_i/UF), sendo que o item deve ser um recurso material ou material processado, sem perdas;
- m_i : fator de conversão em massa do item “i” (kg/UD_i).

Para o cálculo deste indicador, as quantidades de cada material contido na estrutura (q'_i) devem sempre considerar a alocação por massa; do contrário, poderia se chegar a um indicador que não reflète a composição em massa da

estrutura analisada. Ou seja, o cálculo do indicador de consumo de material não deve considerar os fatores de alocação econômica. Além disso, devem ser considerados apenas os materiais consumidos (recursos materiais ou material processado); combustíveis, embora tenham massa, não são contabilizados no indicador de consumo de material.

É importante ressaltar que o indicador de consumo de material não considera perdas. O indicador que considera as perdas de material ao longo do ciclo de vida é chamado “demanda de material” [12]; entretanto, devido à falta de informações sobre a demanda de material de produtos de construção brasileiros no momentoⁱ, ainda não é possível efetuar o cálculo deste indicador de forma consistente, pois não se teriam indicadores para as etapas A1 a A3 (considerando perdas nestas etapas do ciclo de vida).

10. Interpretação dos Resultados

O primeiro passo para interpretar os resultados de emissão de CO₂ incorporadas em materiais ou estruturas consiste em verificar sua plausibilidade, ou seja, se o valor faz sentido. Uma das formas de se fazer isso é comparar o resultado a valores de materiais ou estruturas similares, o que também é conhecido como **benchmark** [6,30]. Em tais comparações, costuma-se verificar se a ordem de grandeza dos resultados é a mesma e, caso se verifiquem diferenças significativas, se há alguma explicação plausível. Este tipo de análise permite identificar rapidamente eventuais erros de cálculo, conversões de unidade, entre outros.

A comparação com indicadores de materiais ou estruturas semelhantes também permite avaliar como o desempenho ambiental do material/estrutura em questão se enquadra em relação a valores de referência. Por exemplo, se um determinado material apresenta um indicador de emissão de CO₂ próximo ao limite superior da faixa do benchmark, provavelmente há espaço para melhorar seu desempenho ambiental.

Ao realizar análises comparativas, é muito importante garantir que a unidade funcional seja equivalente, visando garantir uma comparação justa [24]. Materiais que tenham exatamente a mesma especificação e desempenho podem ser comparados com base em sua unidade declarada (por exemplo, 1 kg de cimento CP V ARI do fabricante “A” versus 1 kg de cimento CP V ARI do fabricante “B”). Caso haja alguma diferença entre os produtos, a comparação necessariamente deve levar em consideração sua equivalência funcional. Além disso, análises comparativas devem sempre levar em consideração as incertezas associadas aos indicadores comparados.

A Figura 6 apresenta um exemplo de comparação com benchmark para a estrutura de concreto armado de um edifício [25]. O benchmark apresentado é baseado na quantificação das emissões de CO₂ incorporadas em 53 edifícios residenciais com estrutura de concreto moldada in-loco, considerando apenas os pavimentos-tipo. Trata-se, portanto, de uma curva baseada em dados reais, embora de uma amostra relativamente pequena e específica para as tipologias adotadas na cidade de São Paulo, sendo apresentada aqui apenas a título de exemplo. Neste caso, aproximadamente 70% das estruturas do benchmark apresentam emissão de CO₂ incorporada inferior à da estrutura analisada (“x” vermelho), o que sugere a possibilidade de otimizar seu desempenho ambiental.

ⁱ O Sidac ainda não dispõe de dados sobre demanda de material.

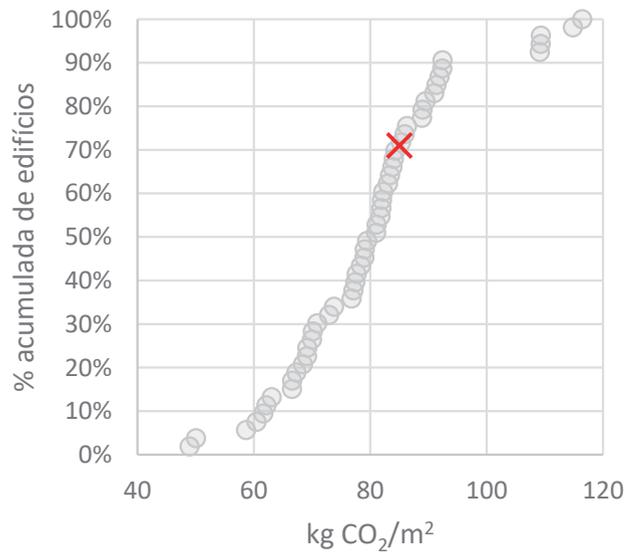


Figura 6 – Exemplo de comparação da emissão de CO₂ incorporada de um edifício específico (representado pelo “x” vermelho) com a curva de distribuição acumulada de CO₂ de edifícios similares (benchmark). Adaptado de [25].

Para avaliar possíveis medidas para melhorar o desempenho ambiental de materiais ou estruturas, recomenda-se realizar a **análise de contribuição**, que consiste em quantificar a contribuição de diferentes itens para a emissão de CO₂ total do material ou estrutura. Os itens com maior contribuição relativa (denominados **hotspots**) indicam prioridades para ações de melhoria do desempenho ambiental. A Figura 7 mostra um exemplo de análise de contribuição dos materiais e elementos estruturais para as emissões de CO₂ incorporadas em uma estrutura de concreto armado integrante do estudo de benchmark citado anteriormente [25].

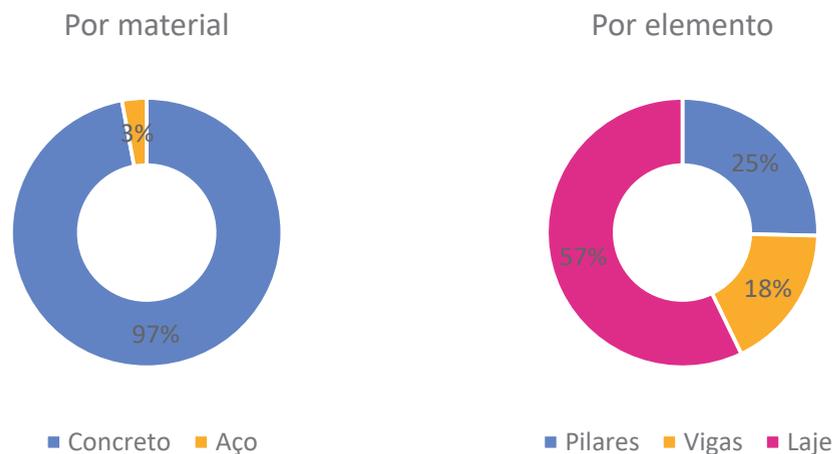


Figura 7 – Exemplo de análise de contribuição para as emissões de CO₂ incorporadas em uma estrutura de concreto armado por material (esquerda) e por elemento estrutural (direita). Adaptado de [25].

11. Relatório

O relatório é o instrumento para documentar a quantificação das emissões de CO₂ incorporadas em materiais cimentícios ou estruturas de concreto. Embora os resultados possam ser sintetizados na forma de uma DAP (principalmente para materiais), é importante também elaborar o relatório para registrar todas as considerações feitas e que embasam os indicadores, permitindo sua verificação e rastreabilidade. A seguir, apresenta-se uma lista das informações mínimas que devem constar de um relatório de quantificação das emissões de CO₂ incorporadas de um material ou estrutura:

- Informações gerais
 - Objetivo da análise
 - Data da análise
 - Identificação do responsável pelo objeto da análise
 - Identificação do responsável pela quantificação das emissões de CO₂
 - Identificação do responsável pela verificação de terceira parte (caso aplicável)
- Informações gerais sobre o material (no caso de materiais cimentícios)
 - Identificação do material
 - Características técnicas (descritas de acordo com a norma técnica pertinente)
 - Normas técnicas pertinentes ao material
 - Identificação da(s) fábrica(s)
- Informações gerais sobre a estrutura (no caso de estruturas de concreto)
 - Identificação do empreendimento
 - Endereço
 - Uso(s) do empreendimento
 - Composição do empreendimento
 - Sistema(s) construtivo(s)
 - Etapa em que se encontra o projeto
- Escopo da avaliação
 - Unidade funcional ou declarada
 - Período de referência (caso aplicável)
 - Etapas do ciclo de vida consideradas (módulos de informação)
 - Elementos construtivos considerados (no caso de estruturas)
- Método de avaliação
 - Referência ao método adotado (caso seja o método descrito neste Boletim Técnico, citá-lo)
 - Critérios de corte adotados
 - Procedimento de alocação (caso aplicável)
- Inventário do ciclo de vida

- Inventário do ciclo de vida consolidado
 - Fontes de dados utilizadas (por exemplo, fatores de emissão de CO₂)
- Indicadores de desempenho ambiental
 - Emissão de CO₂ por unidade funcional ou declarada, por etapa do ciclo de vida
 - Consumo de material (no caso de estruturas)
 - Interpretação dos resultados
 - Conclusão e recomendações

A lista apresentada traz apenas as informações mínimas para garantir rastreabilidade e reprodutibilidade da análise. O relatório pode conter mais informações, a depender do contexto específico de cada avaliação.

12. Exemplos

A seguir, apresentam-se dois exemplos de aplicação dos conceitos explorados neste documento, sendo o primeiro na escala do material (concreto dosado em central) e o segundo na escala da estrutura (estrutura de concreto moldada *in-loco*).

Como o objetivo destes exemplos consiste apenas em ilustrar a aplicação da avaliação de desempenho ambiental da construção, tratam-se de casos simplificados. Produtos e estruturas reais poderão ter um maior nível de complexidade; no entanto, os conceitos e a lógica de cálculo permanecem os mesmos. Cabe observar que os exemplos utilizam valores fictícios que, no entanto, estão dentro da ordem de magnitude verificada em casos reais equivalentes.

12.1. Produção de concreto dosado em central

12.1.1. Dados de entrada

Uma central de concreto quer informar as emissões de CO₂ incorporadas para os três tipos de concreto que produz, do berço ao portão da central. Os traços dos concretos são informados na Tabela 4.

Tabela 4 – Traços dos concretos.

Material	Unid.	Tipo de concreto		
		25 MPa	30 MPa	35 MPa
Cimento (CP-II-F)	kg/m ³	294	343	377
Areia	kg/m ³	784	760	735
Brita	kg/m ³	1078	1029	1005
Aditivo redutor de água	kg/m ³	1.47	1.96	2.45
Água	L/m ³	176	189	189

A central de concreto também disponibilizou informações sobre o consumo mensal de eletricidade, diesel (nos equipamentos internos à central, sem considerar os caminhões betoneira), água (para limpeza da central, além da água do

traço) e a quantidade de resíduos de concreto encaminhada ao aterro de inertes. Também informou a quantidade de cada concreto produzida por mês. As informações estão sintetizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Informações mensais da central de concreto.

Mês	Consumo de eletricidade (kWh)	Consumo de diesel (L)	Consumo de água (m ³)	Geração de resíduo (m ³)	Produção de concreto		
					25 MPa (m ³)	30 MPa (m ³)	35 MPa (m ³)
1	21725	3280	630	142	2500	2800	2600
2	25515	3450	645	154	2700	2700	2700
3	23230	3510	650	171	2600	2850	2700
4	25840	3695	635	151	2700	2650	2600
5	23490	3565	635	170	2700	2700	2700
6	24645	3620	630	175	2600	2650	2700
7	24705	3730	655	146	2650	2800	2650
8	21330	3800	640	166	2600	2650	2650
9	23305	3753	645	150	2600	2700	2600
10	23920	3510	635	173	2500	2750	2600
11	26145	3660	650	158	2800	2800	2700
12	24150	3627	630	164	2550	2650	2600

As distâncias entre a central de concreto e os fornecedores de material e o aterro de inertes para o qual os resíduos são destinados, assim como os respectivos modos de transporte, são informados na Tabela 6.

Tabela 6 – Distâncias entre a central e seus fornecedores de material e o aterro de inertes.

Local	Modo de transporte	Distância (km)
Fábrica de cimento	Caminhão carreta (5 eixos)	350
Fornecedor de areia	Caminhão truck (3 eixos)	150
Fornecedor de brita	Caminhão truck (3 eixos)	80
Fornecedor de aditivo	Caminhão toco (2 eixos)	200
Aterro de inertes	Caminhão truck (3 eixos)	30

Apenas o fornecedor de cimento dispõe de uma DAP do seu produto. De acordo com a DAP, o fator de emissão de CO₂ é de 750 kg CO₂/t cimento.

12.1.2. Escopo

O objetivo da avaliação de desempenho ambiental consiste em declarar as emissões de CO₂ incorporadas em três tipos de concreto, do berço ao portão da central. A unidade declarada é 1 m³ de concreto.

As etapas do ciclo de vida que integram o escopo da análise são a produção das matérias-primas (A1), seu transporte até a central de concreto (A2) e a produção do concreto propriamente dita (A3).

12.1.3. Mapeamento do sistema de produto

A Figura 8 apresenta o mapeamento do sistema de produto para a produção de concreto.

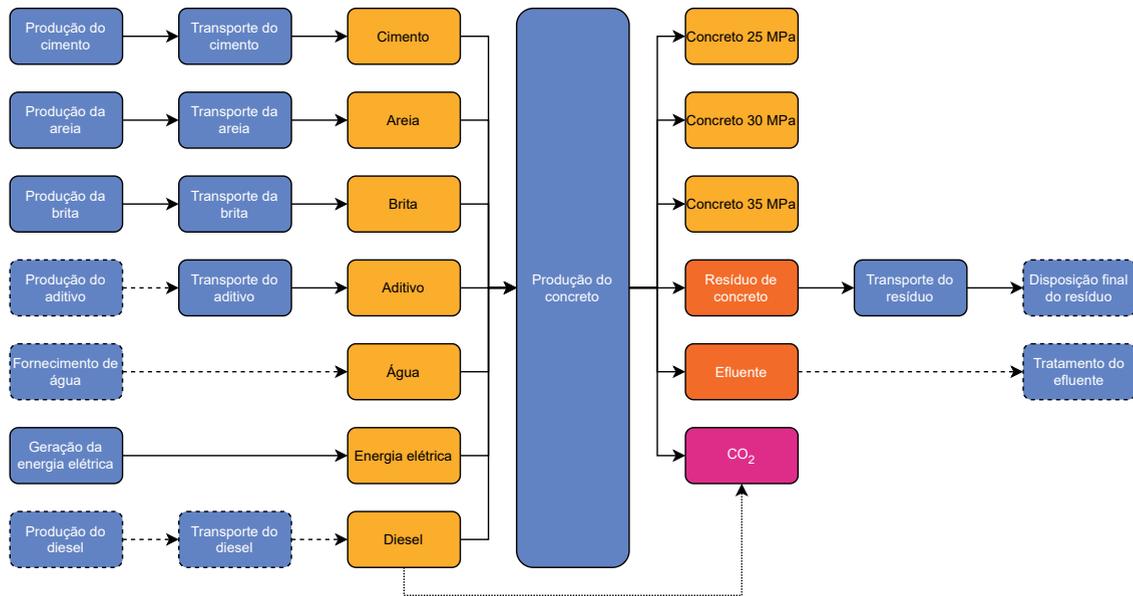


Figura 8 – Mapeamento do sistema de produto da produção de concreto dosado em central, do berço ao portão. Os processos elementares tracejados são aqueles que não foram considerados no escopo do estudo por se enquadrarem nas regras de corte.

12.1.4. Elaboração do inventário

O inventário da produção dos concretos deve informar as quantidades das entradas e saídas em relação à unidade declarada, ou seja, a 1 m³ de cada tipo de concreto. As quantidades das matérias-primas já são informadas por m³; entretanto, tais quantidades não consideram a perda de concreto na central. A central informa uma perda total de concreto de 1920 m³ (ΣV_{res}); no mesmo período, foram produzidos 96000 m³ de concreto (ΣV_{con}). O índice de perdas “p” pode ser calculado da seguinte forma:

$$p = \frac{\Sigma V_{res}}{\Sigma V_{con}} = \frac{1920}{96000} = 2\%$$

Na falta de informações mais precisas, é razoável assumir que o mesmo índice de perdas se aplica a todos os concretos. Sendo assim, as quantidades de material informadas nos traços teóricos devem ser aumentadas em 2% para calcular o consumo total de material.

$$q_{mat,i} = q'_{mat,i} \times (1 + p)$$

Aplicando-se a equação anterior, pode-se calcular o consumo por m³ de cimento, areia, brita, aditivo e água, com perdas, para todas as resistências de concreto. Por exemplo, para a quantidade de cimento do concreto com f_{ck} 30 MPa:

$$q_{cim,30} = 343 \times (1 + 0.02) = 350 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

No caso da água, é necessário ainda acrescentar a água de limpeza da central. A central reporta um consumo total de água para limpeza de 7680 m³ ao longo dos 12 meses ($\Sigma V_{agua,limp}$). Dividindo-se essa quantidade pelo volume total de concreto produzido, obtém-se o consumo de água de limpeza por m³ de concreto ($q_{agua,limp}$). É razoável assumir que não há diferenças no consumo de água de limpeza em função do tipo de concreto.

$$q_{\text{agua,limp}} = \frac{\sum V_{\text{agua,limp}}}{\sum V_{\text{con}}} = \frac{7680}{96000} = 0.08 \text{ (m}^3/\text{m}^3) = 80 \text{ (L/m}^3)$$

A quantidade de água de limpeza deve ser somada à água de cada traço acrescida de perdas do processo ($q_{\text{mat,agua}}$) para obter o consumo total de água. A seguir apresenta-se o cálculo para o concreto com f_{ck} 35 MPa, a título de exemplo:

$$q_{\text{agua}} = q_{\text{mat,agua}} + q_{\text{agua,limp}}$$

$$q_{\text{agua,35}} = 189 \times (1 + 0.02) + 80 = 273 \text{ (L/m}^3)$$

Os resultados das quantidades de cada material acrescidas das perdas constam da Tabela 7.

Os consumos unitários de eletricidade (q_{ele}) e diesel (q_{diesel}) da central podem ser calculados de forma semelhante, dividindo o consumo total ao longo do ano ($\sum Q_{\text{ele}}$, $\sum Q_{\text{diesel}}$) pela produção total de concreto no mesmo período ($\sum V_{\text{con}}$). Novamente, assume-se que os consumos unitários são os mesmos, independentemente do tipo de concreto.

$$q_{\text{ele}} = \frac{\sum Q_{\text{ele}}}{\sum V_{\text{con}}} = \frac{288000}{96000} = 3.0 \text{ (kWh/m}^3)$$

$$q_{\text{diesel}} = \frac{\sum Q_{\text{diesel}}}{\sum V_{\text{con}}} = \frac{43200}{96000} = 0.45 \text{ (L/m}^3)$$

A combustão do diesel gera uma emissão direta de CO₂ na central de concreto. O cálculo da emissão de CO₂ por m³ de concreto devido à combustão do diesel (C_{diesel}) é feito multiplicando-se o consumo unitário de diesel (q_{diesel}) pelo fator de emissão de CO₂ do diesel (c_{diesel}) que, conforme a Tabela 2, é de 2.29 kg CO₂/L.

$$C_{\text{diesel}} = q_{\text{diesel}} \times c_{\text{diesel}} = 0.45 \times 2.29 = 1.03 \text{ (kg CO}_2/\text{m}^3)$$

A geração unitária de resíduo de concreto já foi calculada para obtenção do índice de perdas (0.02 m³/m³), sendo necessário apenas convertê-la para unidade de massa. Considerando que a densidade média no estado fresco dos concretos analisados é de 2322 kg/m³, a massa de resíduo gerada por m³ de concreto é:

$$q_{\text{res}} = p \times \rho_{\text{con}} = 0.02 \times 2322 = 46 \text{ (kg/m}^3)$$

Admite-se que toda a água utilizada para a limpeza da central seja descartada como efluente líquido, após passar pelos tratamentos necessários dentro da central. Sendo assim:

$$q_{\text{efluente}} = q_{\text{agua,limp}} = 0.08 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$$

Em relação ao transporte das matérias-primas e resíduos, sabe-se que os caminhões que transportam cimento, areia, brita e os resíduos de concreto retornam vazios às suas respectivas origens, sendo necessário portanto multiplicar as distâncias de transporte por 2.

A Tabela 7 sintetiza o inventário da central de concreto, do portão ao portão.

Tabela 7 – Inventário da produção dos concretos dosados em central.

Categoria	Entrada ou saída específica	Consumo ou produção			Unid	Transporte	
		Quantidade				Modo	Distância (km)
		25 MPa	30 MPa	35 MPa			
ENTRADAS							
Material processado	Cimento CP-II-F	300	350	385	kg	Carreta 5E	700
	Areia	800	775	750	kg	Truck 3E	300
	Brita	1100	1050	1025	kg	Truck 3E	160
	Aditivo	1.50	2.00	2.50	kg	Toco 2E	200
Eletricidade	Eletricidade da rede pública	3.0	3.0	3.0	kWh		
Combustível	Óleo diesel	0.45	0.45	0.45	L	Indisponível	
Água	Água da rede pública	260	273	273	L		
SAÍDAS							
Resíduo	Resíduo inerte	46	46	46	kg	Truck 3E	60
CO ₂ (emissão)	CO ₂ (diesel)	1.03	1.03	1.03	kg		
Efluente	Efluente	0.08	0.08	0.08	m ³		
PRODUTOS							
Produto	Concreto	1	1	1	m ³		

12.1.5. Cálculo da emissão de CO₂

Para calcular as emissões de CO₂ incorporadas aos concretos, do berço ao portão, é necessário obter dados sobre os fatores de emissão de CO₂ referentes à produção das matérias-primas, à geração de energia elétrica e ao transporte das matérias-primas e resíduos. Apenas o fornecedor de cimento possui uma DAP com um fator de emissão de CO₂ específico; para os demais itens, consideram-se os dados genéricos do Sidac, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores de emissão de CO₂ para as matérias-primas, energia elétrica e modos de transporte adotados na central de concreto.

Item	Fator de emissão de CO ₂		Unid.	Fonte de informação
	mín.	max.		
Matérias-primas				
Cimento (CP-II-F)	750	750	kg CO ₂ /t	DAP
Areia	0*	0.01251	kg CO ₂ /kg	Sidac
Brita	0*	0.004669	kg CO ₂ /kg	Sidac
Aditivo redutor de água			Indisponível	
Energia				
Eletricidade da rede pública	0.07	0.07	kg CO ₂ /kWh	Sidac
Transporte				
Caminhão toco (2 eixos)	0.09778	0.09778	kg CO ₂ /t.km	Sidac
Caminhão truck (3 eixos)	0.06801	0.06801	kg CO ₂ /t.km	Sidac
Caminhão carreta (5 eixos)	0.06091	0.06091	kg CO ₂ /t.km	Sidac

* Na realidade, é improvável produzir areia e brita com um fator de emissão de CO₂ igual a zero, pois ainda que o consumo unitário de energia desses materiais sejam baixos (comparado, por exemplo, à produção de cimento), os equipamentos de mineração são usualmente movidos a combustível fóssil. Trata-se de uma questão associada à forma como o Sidac expressa a incerteza dos dados genéricos. Para maiores detalhes, recomenda-se a consulta à metodologia do Sidac.

Observa-se que não há dado genérico para o fator de emissão de CO₂ referente à fabricação do aditivo. Além disso, também não há informação sobre a origem do diesel utilizado na central (vide Tabela 7). O efeito de omitir esses itens no cálculo do indicador de emissões de CO₂ incorporadas ao concreto será discutido posteriormente.

Como os fatores de emissão de CO₂ dos transportes são informados por t.km, é necessário calcular essa grandeza para cada item a ser transportado, de cada tipo de concreto. A seguir exemplifica-se esse cálculo para o cimento no concreto de f_{ck} 25 MPa (parte da Equação 14 apresentada no item 9.2.1):

$$q_{cim,C25} \times \frac{m_{cim}}{1000} \times d_{tr,cim,C25} = 300 \times \frac{1}{1000} \times 700 = 210 \text{ (t.km)}$$

As quantidades de transporte para todos os itens transportados são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Quantidades de transporte (em t.km) de todos os itens que são transportados.

Entrada ou saída específica	Consumo ou produção			Unid	Transporte		Massa.Distância		
	Quantidade				Modo	Dist. (km)	(t.km)		
	25 MPa	30 MPa	35 MPa				25 MPa	30 MPa	35 MPa
Cimento	300	350	385	kg	Carreta 5E	700	210	245	270
Areia	800	775	750	kg	Truck 3E	300	240	233	225
Brita	1100	1050	1025	kg	Truck 3E	160	176	168	164
Aditivo	1.50	2.00	2.50	kg	Toco 2E	200	0.30	0.40	0.50
Resíduo	46	46	46	kg	Truck 3E	60	2.77	2.77	2.77

Para calcular as emissões do berço ao portão, é necessário multiplicar as quantidades dos insumos pelos seus respectivos fatores de emissão, acrescentar as emissões do transporte e somar a emissão direta de CO₂ que ocorre na central de concreto devido à combustão do diesel. A Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 apresentam os cálculos da emissão de CO₂ para os concretos de 25 MPa, 30 MPa e 35 MPa, respectivamente.

Tabela 10 – Cálculo da emissão de CO₂ do berço ao portão da central, para o concreto de 25 MPa.

Inventário da central		Emissão de CO ₂ da produção das matérias-primas				Emissão de CO ₂ do transporte			Emissão de CO ₂ do berço ao portão			
Entradas e saídas	Qtde	Unid.	Fator de emissão de CO ₂			qtde.	Fator de emissão de CO ₂		Emissão de CO ₂		máximo	
			mín	máx	mín		máx	mín=máx	mín=máx	mínimo		máximo
			(kg CO ₂ /unid) (kg CO ₂ /m ³)			(t.km) (kg CO ₂ /t.km)			(kg CO ₂ /m ³) (kg CO ₂ /m ³)			
ENTRADAS												
Cimento CP-II-F	300	kg	0.75	0.75	225	225	225	210	0.06091	13	238	238
Areia	800	kg	0	0.01251	0	10	10	240	0.06801	16	16	26
Brita	1100	kg	0	0.004669	0	5.1	5.1	176	0.06801	12	12	17
Aditivo	1.50	kg	-	-	-	-	-	0.3	0.09778	0.03	0.03	0.03
Eleticidade	3.0	kWh	0.07	0.07	0.21	0.21	0.21	-	-	-	0.21	0.21
Óleo diesel	0.45	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Água	260	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SAÍDAS												
Resíduo inerte	46	kg	-	-	-	-	-	2.77	0.06801	0.19	0.19	0.19
CO ₂ (diesel)	1.03	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	1.03	1.03
Efluente	0.08	m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PRODUTOS												
Concreto 25 MPa	1	m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	268	283

Tabela 11 – Cálculo da emissão de CO₂ do berço ao portão da central, para o concreto de 30 MPa.

Inventário da central		Emissão de CO ₂ da produção das matérias-primas		Emissão de CO ₂ do transporte		Emissão de CO ₂ do berço ao portão	
Entradas e saídas	Qtde	Unid.	Fator de emissão de CO ₂		qtde.	Fator de Emissão de CO ₂	
			mín	máx		mín=máx	mín=máx
			(kg CO ₂ /unid)	(kg CO ₂ /m ³)	(t.km)	(kg CO ₂ /t.km)	(kg CO ₂ /m ³)
ENTRADAS							
Cimento CP-II-F	350	kg	0.75	263	245	0.06091	277
Areia	775	kg	0	0	233	0.06801	16
Brita	1050	kg	0	0	168	0.06801	11
Aditivo	2.00	kg	-	-	0.4	0.09778	0.04
Eletricidade	3.0	kWh	0.07	0.21	-	-	0.21
Óleo diesel	0.45	L	-	-	-	-	-
Água	273	L	-	-	-	-	-
SAÍDAS							
Resíduo inerte	46	kg	-	-	2.77	0.06801	0.19
CO ₂ (diesel)	1.03	kg	-	-	-	-	1.03
Efluente	0.08	m ³	-	-	-	-	-
PRODUTOS							
Concreto 30 MPa	1	m ³	-	-	-	-	306

Tabela 12 – Cálculo da emissão de CO₂ do berço ao portão da central, para o concreto de 35 MPa.

Entradas e saídas	Qtde	Unid.	Emissão de CO ₂ da produção das matérias-primas				Emissão de CO ₂ do transporte				Emissão de CO ₂ do berço ao portão			
			Fator de emissão de CO ₂		Emissão de CO ₂		Fator de emissão de CO ₂		Emissão de CO ₂		Fator de emissão de CO ₂		Emissão de CO ₂	
			mínimo	máximo	mínimo	máximo	qtde.	mín=máx	mín=máx	mín=máx	mínimo	máximo	mínimo	máximo
(kg CO ₂ /unid)(kg CO ₂ /unid) (kg CO ₂ /m ³) (kg CO ₂ /m ³) (t.km) (kg CO ₂ /t.km) (kg CO ₂ /m ³) (kg CO ₂ /m ³)													(kg CO ₂ /m ³)	
ENTRADAS														
Cimento CP-II-F	385	Kg	0.75	0.75	289	289	270	0.06091	16	305	305			
Areia	750	Kg	0	0.01251	0	9.4	225	0.06801	15	15	25			
Brita	1025	Kg	0	0.004669	0	4.8	164	0.06801	11	11	16			
Aditivo	2.5	Kg	-	-	-	-	0.5	0.09778	0.05	0.05	0.05			
Eleticidade	3.0	kWh	0.07	0.07	0.21	0.21	-	-	-	0.21	0.21			
Óleo diesel	0.45	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Água	273	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
SAÍDAS														
Resíduo inerte	46	Kg	-	-	-	-	2.77	0.06801	0.19	0.19	0.19			
CO ₂ (diesel)	1.03	Kg	-	-	-	-	-	-	-	-	1.03			
Efluente	0.08	m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
PRODUTOS														
Concreto 35 MPa	1	m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	333		347	

O cálculo das emissões de CO₂ incorporadas aos concretos não considerou o impacto da produção do aditivo. O aditivo representa entre 0.06% e 0.11% da massa do concreto; portanto, pelo critério de corte de massa, ele poderia ser omitido da análise. Com relação ao critério de significância ambiental, o aditivo poderia ser omitido se sua emissão de CO₂ representasse menos de 1% da emissão total de CO₂ do concreto; ou seja, se o seu fator de emissão de CO₂ fosse, no máximo, o valor calculado de acordo com a seguinte equação:

$$c_{\text{aditivo,max}} = \frac{0,01 \times C_{\text{con,min}}}{q_{\text{aditivo}}}$$

Onde $c_{\text{aditivo,max}}$ é o fator de emissão de CO₂ máximo do aditivo para que ele ainda seja enquadrado no critério de corte, $C_{\text{con,min}}$ é o resultado de emissão de CO₂ mínimo do concreto e q_{aditivo} é o consumo de aditivo por m³ de concreto. A Tabela 13 apresenta os resultados. Sendo assim, se o aditivo tiver um fator de emissão de até 1.33 kg CO₂/kg aditivo, ele se enquadraria no critério de corte para os três concretos analisados.

Tabela 13 – Fatores de emissão máximos do aditivo para que ele se enquadre no critério de corte de significância ambiental.

Parâmetro	Unidade	Tipo de concreto		
		25 MPa	30 MPa	35 MPa
$C_{\text{con,max}}$	kg CO ₂ /m ³	268	306	333
q_{aditivo}	kg/m ³	1.5	2.0	2.5
$c_{\text{aditivo,max}}$	kg CO ₂ /kg	1.78	1.53	1.33

De acordo com a Declaração Ambiental de Produto da Federação Europeia de Associações de Aditivos de Concreto (EFCA) para plastificantes e superplastificantesⁱ (aditivos redutores de água conforme a terminologia brasileira), o potencial de aquecimento global fóssil (GWP fóssil) deste tipo de aditivo é 1.50 kg CO_{2e}/kg. Ou seja, com base nesse valor, seria incorreto omitir o aditivo do cálculo da pegada de CO₂ para o concreto de 35 MPa. O mesmo raciocínio pode ser adotado para os demais processos omitidos do cálculo da emissão de CO₂ (produção e transporte do diesel, fornecimento de água, disposição final dos resíduos de concreto, tratamento e disposição de efluentes).

12.1.6. Interpretação dos resultados

É possível comparar os resultados dos concretos analisados com os respectivos dados genéricos do Sidac, para avaliar se os valores obtidos para as emissões de CO₂ são altos ou baixos em relação à faixa de valores esperada para um concreto de mesma resistência característica à compressão. A Figura 9 apresenta essa comparação.

ⁱ Disponível em <http://www.efca.info/efca-publications/environmental/>

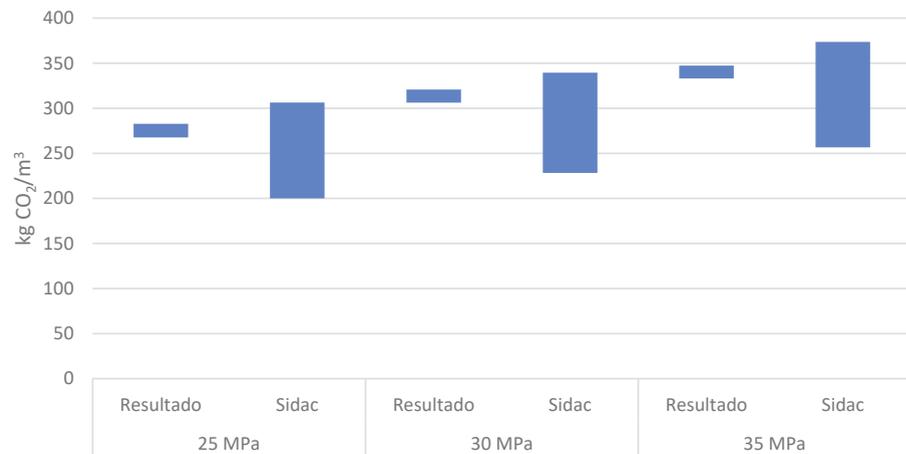


Figura 9 – Comparação entre os resultados de emissão incorporada de CO₂ dos concretos da central com os dados genéricos do Sidac.

Observa-se que os resultados dos concretos da central estudada estão próximos ao limite superior das faixas de valores de concretos equivalentes disponíveis no Sidac. Sendo assim, há espaço para melhorar o desempenho ambiental destes concretos. Para avaliar quais ações podem ser tomadas nesse sentido, a Figura 10 apresenta a contribuição dos diferentes processos dentro da fronteira do sistema de produto para as emissões de CO₂ do berço ao portão.

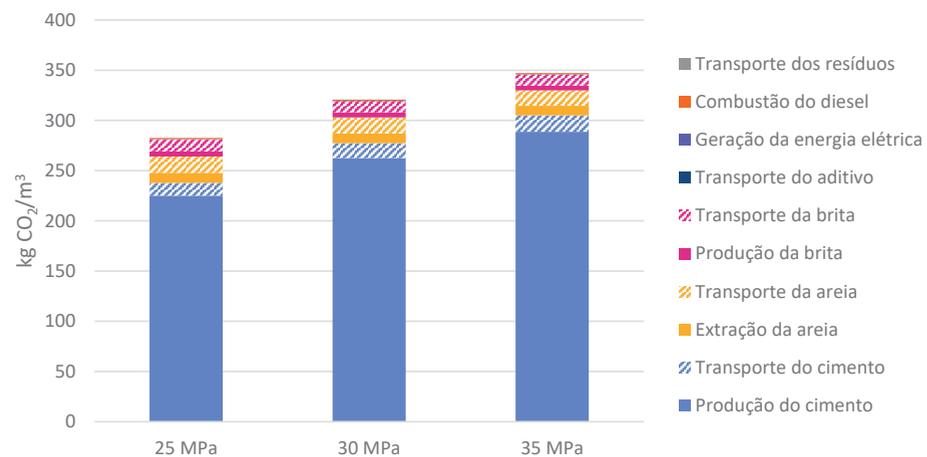


Figura 10 – Contribuição dos diferentes processos para as emissões de CO₂ do concreto, do berço ao portão, com base nos valores máximos de emissão de CO₂.

A principal contribuição para as emissões de CO₂ dos concretos fictícios analisados neste exemplo é a produção de cimento, que responde por uma parcela

entre 80% e 83% das emissões totais. A produção dos agregados contribui com algo entre 4% e 5% das emissões. Já o transporte das matérias-primas e dos resíduos contribuem conjuntamente com 12% a 15%. As emissões associadas à geração de energia elétrica apresentam uma contribuição irrisória (inferior a 0.1%), ao passo que as emissões devidas à combustão de diesel na central representam entre 0.3% e 0.4% das emissões de CO₂ do berço ao portão.

Sendo assim, a ação prioritária para reduzir as emissões incorporadas de CO₂ nos concretos analisados neste exemplo hipotético consiste em reduzir as emissões associadas ao consumo de cimento, seja otimizando a dosagem do concreto, seja buscando um fornecedor de cimento que tenha uma emissão de CO₂ menor, ou ambos conjuntamente. Isso ilustra como a quantificação das emissões de CO₂ com base na abordagem do ciclo de vida pode apoiar decisões de tecnologia do concreto para descarbonizar o material, mantendo o seu desempenho.

Os resultados da análise de contribuição mostram ainda que ações tomadas dentro da central, como, por exemplo, a instalação de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica, ou a troca dos equipamentos movidos a diesel por equipamentos elétricos, teriam um efeito irrisório sobre a pegada de CO₂ do concreto neste caso.

12.2. Produção de estrutura de concreto armado

12.2.1. Dados de entrada

Uma empresa construtora deseja calcular o consumo de material e as emissões de CO₂ incorporadas em uma estrutura de concreto armado moldada in-loco, do berço à obra. Trata-se de um edifício de 24 pavimentos tipo, com uma área construída por pavimento de 614 m². A Tabela 14 informa as quantidades de concreto e aço e a área de fôrmas para o pavimento tipo, conforme o projeto estrutural.

Tabela 14 – Quantidades de concreto e aço e área de fôrmas para o pavimento tipo.

Parâmetro	Unid.	Pilares	Vigas	Lajes
Volume de concreto	m ³	52	23	65
Quantidade de aço	kg	6140	2545	2513
Área de fôrmas	m ²	543	334	551

Nos 12 primeiros pavimentos-tipo, utiliza-se concreto de f_{ck} 35 MPa e nos 12 últimos, concreto de f_{ck} 30 MPa. O aço utilizado corresponde a vergalhões CA-50.

Para a etapa de obra, a construtora estima os parâmetros apresentados na Tabela 15. O aço é adquirido cortado e dobrado. A construtora utiliza fôrmas de compensado plastificado, com 12 reutilizações para cada jogo de fôrmas. O escoamento utilizado é metálico.

Tabela 15 – Estimativas de parâmetros para a etapa de obra.

Parâmetro	Unid.	Valor
Índice de perdas - concreto	%	5%
Índice de perdas – aço	%	1%
Consumo de diesel para bombeamento do concreto	L/m ³	0.5

A construtora também informou a distância entre o canteiro de obras e os fornecedores de material, assim como para os locais de destinação dos resíduos gerados no canteiro de obras (Tabela 16).

Tabela 16 – Distâncias entre o canteiro de obras e os fornecedores de material / locais de destinação de resíduos

Local	Modo de transporte	Distância (km)
Central de concreto	Caminhão betoneira	10
Fornecedor de aço	Carreta (4 eixos)	150
Fornecedor de compensado	Carreta (4 eixos)	250
Fornecedor de madeira serrada	Carreta (4 eixos)	120
Aterro de RCD	Caminhão truck (3 eixos)	30
Usina de reciclagem de aço	Carreta (4 eixos)	20
Incineração de resíduos de madeira	Carreta (4 eixos)	80

Os resíduos de concreto são encaminhados a um aterro de resíduos de construção e demolição (RCD). Os resíduos de aço são encaminhados para a reciclagem, enquanto os de madeira (provenientes das fôrmas) são encaminhados para incineração sem recuperação energética.

12.2.2. Escopo

O objetivo da análise consiste em calcular o consumo de material e as emissões de CO₂ incorporadas em uma estrutura de concreto armado moldada in-loco, do berço à obra. A unidade declarada em relação à qual os indicadores serão expressos é 1 m² de edifício, considerando sua área construída.

As etapas do ciclo de vida que serão contempladas no escopo do estudo incluem o estágio de produto dos materiais utilizados na estrutura (A1-A3), o transporte dos materiais até a obra (A4) e a construção da estrutura (A5).

12.2.3. Mapeamento do sistema de produto

A Figura 11 apresenta o mapeamento do sistema de produto para a produção da estrutura de concreto armado analisada.

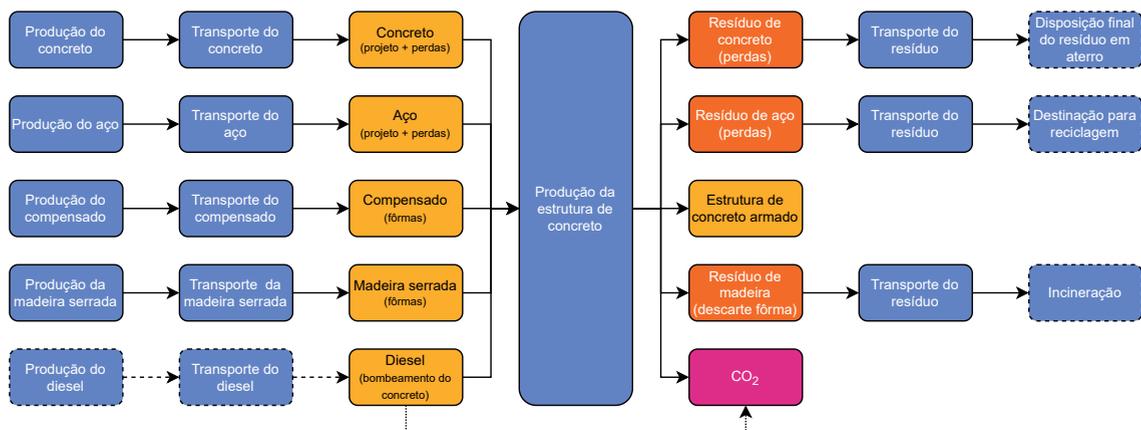


Figura 11 – Mapeamento do sistema de produto da produção de estrutura de concreto armado, do berço à obra. Os processos elementares tracejados são aqueles que não foram considerados no escopo do estudo por se enquadrarem nas regras de corte.

12.2.4. Elaboração do inventário

O estágio de produto (A1-A3) deve considerar a produção dos materiais que integram a estrutura, ou seja, concreto e aço. As quantidades dos materiais são aquelas especificadas em projeto, sem perdas. No caso do concreto, é necessário diferenciar entre os pavimentos que utilizam concreto de f_{ck} 30 e 35 MPa:

$$q'_{c,fck} = \frac{n_{fck} \times Q_{c,pav}}{n \times A_{pav}} = \frac{12 \times 140}{14736} = 0.114 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$$

Onde $q'_{c,fck}$ é a quantidade de concreto de um determinado f_{ck} (30 ou 35 MPa), sem perdas; n_{fck} é o número de pavimentos que adotam aquele f_{ck} ; $Q_{c,pav}$ é a quantidade de concreto por pavimento (em volume); n é o número total de pavimentos e A_{pav} é a área de cada pavimento.

No caso do aço, como não há diferenciação entre pavimentos, basta dividir a quantidade especificada para 1 pavimento ($Q_{aço,pav}$) pela área do pavimento:

$$q'_{aço} = \frac{Q_{aço,pav}}{A_{pav}} = \frac{11198}{614} = 18.2 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

A Tabela 17 apresenta o inventário da estrutura para o estágio de produto. As quantidades por elemento estrutural são calculadas, para permitir analisar posteriormente a contribuição de cada elemento para os indicadores de desempenho ambiental totais da estrutura.

Tabela 17 – Inventário da estrutura de concreto armado, estágio de produto (A1-A3).

Categoria	Entrada ou saída específica	Consumo ou produção				Unid
		Quantidade				
		Pilares	Vigas	Laje	Total	
ENTRADAS						
Material processado	Concreto 30 MPa	0.042	0.019	0.053	0.114	m ³
	Concreto 35 MPa	0.042	0.019	0.053	0.114	m ³
	Aço	10.0	4.1	4.1	18.2	kg
PRODUTOS						
Produto	Estrutura	-	-	-	1	m ²

Para elaborar o inventário da etapa de transporte dos materiais até o canteiro de obras, é necessário calcular a quantidade de material a ser transportada (em massa) e multiplicá-la pela respectiva distância de transporte. Considerando as densidades informadas no Sidac para os concretos de 2360 kg/m³ (f_{ck} 30 MPa) e 2375 kg/m³ (f_{ck} 35 MPa), é possível converter as quantidades constantes da Tabela 17 em massa e multiplicá-las pelas respectivas distâncias de transporte. As distâncias de transporte são multiplicadas por 2, para considerar o retorno dos caminhões vazios à origem. A Tabela 18 apresenta o inventário para a etapa de transporte.

Tabela 18 – Inventário da estrutura de concreto armado, etapa de transporte até a obra (A4). Valores por m² de área construída.

Entrada ou saída específica	Qtde (kg/m ²)				Transporte		Qtde. (t.km/m ²)			
	Pilares	Vigas	Lajes	Total	Modo	Dist. (km)	Pilares	Vigas	Lajes	Total
Concreto 30 MPa	100	44	125	269	Betoneira	20	2.0	0.88	2.5	5.4
Concreto 35 MPa	101	44	126	271	Betoneira	20	2.0	0.89	2.5	5.4
Aço	10	4.1	4.1	18	Carreta 4E	300	3.0	1.2	1.2	5.5

O inventário da etapa de construção do edifício (A5) inclui as perdas de material, o consumo de materiais para as fôrmas e o óleo diesel para bombeamento do concreto. Para as perdas, devem ser considerados os seguintes processos: produção dos materiais desperdiçados (etapas “A1-A3” dentro da etapa A5), transporte dos materiais desperdiçados até a obra (etapa “A4”), transporte dos resíduos gerados até o local de destinação final (etapa “C2”), preparação para a reciclagem (etapa “C3”) e disposição final dos resíduos (etapa “C4”). Considera-se que todo o resíduo gerado é desperdício, ou seja, não estão sendo consideradas perdas incorporadas à estrutura. A quantidade de materiais desperdiçados (concreto ou aço) pode ser calculada da seguinte forma (exemplificada para o concreto):

$$q''_{c,fc k} = q'_{c,fc k} \times p = 0,114 \times 0,05 = 0,0057 \text{ (m}^3/\text{m}^2\text{)}$$

Onde $q''_{c,fc k}$ é a quantidade de concreto de um determinado f_{ck} desperdiçado, $q'_{c,fc k}$ é a quantidade de concreto especificada em projeto e “ p ” é o índice de perdas. A Tabela 20 apresenta as quantidades de material desperdiçado, por elemento estrutural.

Para calcular a quantidade de madeira utilizada nas fôrmas, é necessário descobrir o consumo de material (chapas de compensado e madeira serrada) por m^2 de área de fôrma, que é a informação proveniente do projeto estrutural. Neste exemplo, serão considerados os consumos de material informados nas composições do SINAPI, para fôrmas com 12 reutilizações. A Tabela 19 apresenta o consumo de material para produção das fôrmas, por m^2 de área de fôrma para cada elemento estrutural. As quantidades informadas na tabela já consideram a relação entre as composições unitárias, conforme descrito na coluna “observação”.

Tabela 19 – Consumo de compensado e madeira serrada para fôrmas, estimado com base em composições unitárias do SINAPI e considerando 12 reutilizações.

Item	Qtde.	Unid.	Observação
Fôrma para pilares	1	m²	Fontes de informação: composições SINAPI 92435 e 92264
Compensado plastificado (17 mm)	0.13	m ² /m ²	{0.094 m ² fôrma para pilares/m ² área de forma x 1.34 m ² compensado/m ² fôrma para pilares}
Madeira serrada bruta - pinus	0.0028	m ³ /m ²	{0.094 m ² fôrma para pilares/m ² área de forma x 9.237 m sarrafo/m ² fôrma para pilares x 0.001875 m ³ madeira/m sarrafo*} + {0.094 m ² fôrma para pilares/m ² área de forma x 2.308 m pontalete/m ² fôrma para pilares x 0.005625 m ³ madeira/m pontalete**}
Fôrma para vigas	1	m²	Fontes de informação: composições SINAPI 92472 e 92266
Compensado plastificado (17 mm)	0.17	m ² /m ²	{0.148 m ² fôrma para vigas/m ² área de forma x 1.146 m ² compensado/m ² fôrma para vigas}
Madeira serrada bruta - pinus	0.0031	m ³ /m ²	{0.186 m pontalete/m ² área de fôrma x 0.005625 m ³ madeira/m pontalete**} + {0.148 m ² fôrma para vigas/m ² área de forma x 6.952 m sarrafo/m ² fôrma para vigas x 0.001875 m ³ madeira/m sarrafo*} + {0.148 m ² fôrma para vigas/m ² área de forma x 0.166 m pontalete/m ² fôrma para vigas x 0.005625 m ³ madeira/m pontalete**} +
Fôrma para laje maciça	1	m²	Fontes de informação: composições SINAPI 92530 e 92268
Compensado plastificado (17 mm)	0.13	m ² /m ²	{0.122 m ² fôrma para lajes/m ² área de forma x 1.05 m ² compensado/m ² fôrma para lajes}
Madeira serrada bruta - pinus	0.00037	m ³ /m ²	{0.038 m viga de madeira/m ² área de forma x 0.010 m ³ /m viga de madeira***}

* sarrafo (2.5 x 7.5) cm

** pontalete (7.5 x 7.5) cm

*** viga com 5.1 kg/m, densidade da madeira de 530 kg/m³

Multiplicam-se então os consumos unitários de material pela área de fôrma do respectivo elemento estrutural, dividida pela área do pavimento para obter as quantidades em relação a 1 m² de área construída. A seguir apresenta-se, como exemplo, o cálculo para o consumo de compensado nas lajes:

$$q_{comp,laje} = 0.13 \times \frac{551}{614} = 0.12 \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)}$$

A Tabela 20 apresenta as quantidades de material utilizadas nas fôrmas, detalhadas por elemento estrutural.

Todo o material desperdiçado se transforma em resíduo; no caso do concreto, a quantidade de resíduos (em kg) é calculada multiplicando-se a quantidade desperdiçada pela respectiva densidade, enquanto para o aço nenhuma conversão é necessária. Toda a madeira utilizada para as fôrmas também vira resíduo ao término da obra. Como o resíduo de madeira usualmente é quantificado em m³, para obter a quantidade de resíduo basta calcular o volume de compensado em volume e somá-la ao volume de madeira serrada. A Tabela 20 apresenta as quantidades de todos os resíduos gerados durante a obra.

Por fim, é necessário calcular o consumo de diesel para bombeamento do concreto, multiplicando-se o consumo de diesel por m³ de concreto bombeado pelo volume total de concreto, incluindo as perdas:

$$q_{diesel} = 0.5 \times (q'_{c,25} + q'_{c,30} + q''_{c,25} + q''_{c,30})$$

$$q_{diesel} = 0.5 \times (0.114 + 0.114 + 0.0057 + 0.0057) = 0.12 \text{ (L/m}^2\text{)}$$

Multiplica-se então o consumo de diesel pelo respectivo fator de emissão de CO₂ (2.29 kg CO₂/L) para obter a emissão direta de CO₂ no canteiro de obras devido ao bombeamento de concreto. A Tabela 20 apresenta os valores para o consumo de diesel e respectivas emissões de CO₂, por elemento estrutural.

Tabela 20 – Inventário da estrutura de concreto armado, etapa de construção (A5), considerando a produção dos materiais desperdiçados, as fôrmas, o consumo de diesel para bombeamento do concreto e a geração de resíduos.

Categoria	Entrada ou saída específica	Consumo ou produção				Unid
		Quantidade				
		Pilares	Vigas	Laje	Total	
ENTRADAS						
Material processado	Concreto 30 MPa	0.0021	0.00094	0.0026	0.0057	m ³
	Concreto 35 MPa	0.0021	0.00094	0.0026	0.0057	m ³
	Aço	0.10	0.041	0.041	0.18	kg
	Compensado	0.11	0.092	0.11	0.32	m ²
	Madeira serrada bruta (pinus)	0.0025	0.0017	0.00033	0.0045	m ³
Combustível	Óleo diesel	0.044	0.020	0.056	0.12	L
SAÍDAS						
Resíduos	Resíduo de concreto (aterro de RCD)	10	4.4	13	27	kg
	Resíduo de aço (reciclagem)	0.10	0.041	0.041	0.18	kg
	Resíduo de madeira (incineração)	0.0044	0.0033	0.0023	0.01	m ³
CO ₂ (emissão)	CO ₂ (diesel)	0.10	0.045	0.13	0.27	kg
PRODUTOS						
Produto	Estrutura	-	-	-	1	m ²

Para calcular o transporte da quantidade de materiais desperdiçados e das fôrmas até a obra, bem como o transporte dos resíduos gerados até o local de processamento ou disposição final, é necessário converter as quantidades em massa (t) e multiplicá-las pelas respectivas distâncias de transporte, multiplicadas por 2 para considerar o retorno vazio à origem. A Tabela 21 apresenta os resultados.

Tabela 21 – Inventário da estrutura de concreto armado, etapa de construção (A5), considerando a produção dos materiais desperdiçados e das fôrmas até a obra e o transporte dos resíduos até a destinação final. Valores por m² de área construída.

Entrada ou saída específica	Qtde (kg/m ²)				Transporte		Qtde. (t.km/m ²)			
	Pilares	Vigas	Lajes	Total	Modo	Dist. (km)	Pilares	Vigas	Lajes	Total
Concreto 30 MPa	5.0	2.2	6.2	13	Betoneira	20	0.10	0.044	0.12	0.27
Concreto 35 MPa	5.0	2.2	6.3	14	Betoneira	20	0.10	0.044	0.13	0.27
Aço	0.10	0.041	0.041	0.18	Carreta 4E	300	0.030	0.012	0.012	0.055
Compensado	1.0	0.83	1.0	2.9	Carreta 4E	500	0.50	0.42	0.52	1.4
Madeira	1.3	0.90	0.17	2.4	Carreta 4E	240	0.32	0.22	0.042	0.58
Resíduo concreto	10	4.4	13	27	Truck 3E	60	0.60	0.27	0.75	1.6
Resíduo aço	0.10	0.041	0.041	0.18	Carreta 4E	40	0.0040	0.0017	0.0016	0.0073
Resíduo madeira	2.3	1.7	1.2	5.3	Carreta 4E	160	0.37	0.28	0.19	0.84

Neste caso, não será considerado o consumo de água devido à falta de informações específicas (por exemplo, para cura do concreto) e porque não tem influência sobre os resultados de consumo de material e emissão de CO₂. Também não será considerado o consumo de energia elétrica no canteiro (por exemplo, para transporte vertical do aço, fabricação das fôrmas etc.) pois é difícil discretizar o consumo de eletricidade por serviço e porque tende a ter uma contribuição pequena comparada ao restante do ciclo de vida da estrutura.

A Tabela 22 apresenta o inventário consolidado da estrutura de concreto, do berço à obra.

Tabela 22 – Inventário da produção da estrutura de concreto armado (berço à obra).

Categoria	Entrada ou saída específica	Consumo ou produção				Un	Modo	Distância (km)
		Quantidade						
		Pilares	Vigas	Lajes	Total			
ENTRADAS								
Material processado	Concreto 30 MPa	0.044	0.020	0.056	0.12	m ³	Betoneira	20
	Concreto 35 MPa	0.044	0.020	0.056	0.12	m ³	Betoneira	20
	Aço	10	4.2	4.1	18	kg	Carreta 4E	300
	Compensado	0.11	0.092	0.11	0.32	m ²	Carreta 4E	500
	Madeira	0.0025	0.0017	0.0003	0.004	m ³	Carreta 4E	240
Combustível	Óleo diesel	0.044	0.020	0.056	0.12	L		
SAÍDAS								
Resíduo	Concreto	10	4.4	13	27	kg	Truck 3E	60
	Aço	0.10	0.041	0.041	0.18	kg	Carreta 4E	40
	Madeira	0.0044	0.0033	0.0023	0.010	m ³	Carreta 4E	160
CO ₂ (emissão)	CO ₂ (diesel)	0.10	0.045	0.13	0.27	kg		
PRODUTOS								
Produto	Estrutura				1	m ²		

12.2.5. Cálculo da emissão de CO₂

Para calcular as emissões de CO₂ incorporadas à estrutura, é necessário obter dados sobre os fatores de emissão de CO₂ na produção dos materiais (inclusive fôrmas) e transporte. A construtora não tem ainda uma definição de quem serão os fornecedores dessa obra; sendo assim, é necessário utilizar dados genéricos. A Tabela 23 apresenta a relação dos fatores de emissão necessários.

Tabela 23 – Fatores de emissão de CO₂ para as matérias-primas, energia elétrica e modos de transporte adotados na central de concreto.

Item	Fator de emissão de CO ₂		Unid.	Fonte de informação
	mín.	max.		
Matérias-primas				
Concreto 30 MPa	228	339	kg CO ₂ /m ³	Sidac
Concreto 35 MPa	257	374	kg CO ₂ /m ³	Sidac
Aço CA-50	0.43	1.1	kg CO ₂ /kg	Sidac
Madeira serrada bruta (pinus)	17	35	kg CO ₂ /m ³	Sidac
Compensado plastificado 17mm	7.2	10.8	kg CO ₂ /m ²	EPD*
Transporte				
Caminhão betoneira	0.096	0.096	kg CO ₂ /t.km	Sidac
Caminhão truck (3 eixos)	0.068	0.068	kg CO ₂ /t.km	Sidac
Caminhão carreta (4 eixos)	0.066	0.066	kg CO ₂ /t.km	Sidac

* Estimativa com base em uma EPD de uma associação australiana de produtos de madeira (EPD S-P-00564). A EPD informa um GWP de 8.95 kg CO_{2e}/m² de compensado plastificado de espessura 17mm utilizado como fôrma para estruturas de concreto. Arbitrou-se uma variação de ± 20% em torno desse valor determinístico para consideração das incertezas.

Multiplicando-se a quantidade de cada insumo, em cada etapa do ciclo de vida, pelo respectivo fator de emissão obtém-se a emissão de CO₂ da estrutura. A Tabela 24 apresenta os resultados, por etapa do ciclo de vida da estrutura.

Tabela 24 – Cálculo da emissão de CO₂ do berço à obra, para a estrutura de concreto armado.

Item de inventário	Unid.	Etapas A1-A3		Etapas A4		Etapas A1-A3 + C3/C4		Etapas A4 + C2		Etapas A1-A5									
		F.E. CO ₂	Qtde	Emissão CO ₂	F.E. CO ₂	Qtde	Emissão CO ₂	F.E. CO ₂	Qtde	CO ₂	Emissão CO ₂	CO ₂							
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max						
ENTRADAS																			
Concreto 30 MPa	m ³	228	339	0.11	26	39	0.096	5.4	0.52	228	339	0.0057	1.3	1.9	0.096	0.27	0.026	28	41
Concreto 35 MPa	m ³	257	374	0.11	29	43	0.096	5.4	0.52	257	374	0.0057	1.5	2.1	0.096	0.27	0.026	31	45
Aço CA-50	kg	0.43	1.1	18	7.8	19	0.066	5.5	0.36	0.43	1.1	0.18	0.08	0.19	0.066	0.055	0.0036	8.2	20
Compensado	m ²	-	-	-	-	-	-	-	-	7.2	10.8	0.32	2.3	3.4	0.066	1.4	0.095	2.4	3.5
Madeira	m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	17	35	0.0045	0.076	0.16	0.066	0.58	0.038	0.11	0.20
Óleo diesel	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-
SAÍDAS																			
Resíduo concreto	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	-	-	0.068	1.6	0.11	0.11	0.11
Resíduo aço	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.18	-	-	0.066	0.0073	0.00048	0.00048	0.00048
Resíduo madeira	m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	0.066	0.84	0.056	0.056	0.056
CO ₂ (diesel)	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27	0.27	-	-	-	0.27	0.27
PRODUTOS																			
Estrutura	m ²	-	-	1	63	101	-	-	1.4	-	-	-	5.5	8.1	-	-	0.35	70	111

Para calcular o consumo de materiais da estrutura, basta converter todas as entradas (exceto o diesel, que é utilizado como combustível) em massa. A Tabela 25 apresenta os resultados.

Tabela 25 – Consumo de material da estrutura de concreto armado, do berço à obra.

Material	Etapas A1-A3 (kg/m ²)				Etapa A5 (kg/m ²)				A1-A5 (kg/m ²)
	Pilares	Vigas	Laje	Total	Pilares	Vigas	Laje	Total	
Concreto 30 MPa	100	44	125	269	5.0	2.2	6.2	13	283
Concreto 35 MPa	101	44	126	271	5.0	2.2	6.3	14	284
Aço	10	4.1	4.1	18	0.10	0.041	0.041	0.18	18
Compensado	-	-	-	-	1.0	0.83	1.0	2.9	2.9
Madeira	-	-	-	-	1.3	0.90	0.17	2.4	2.4
Total	211	93	255	559	12	6.2	14	32	591

12.2.6. Interpretação dos resultados

A estrutura de concreto armado analisada apresenta um consumo total de material de 591 kg/m² e sua emissão total de CO₂ varia entre 70 e 111 kg CO₂/m².

A primeira análise que pode ser feita é quantificar a contribuição das diferentes etapas do ciclo de vida para os indicadores de desempenho ambiental da estrutura (Figura 12). Observa-se que as etapas A1-A3, ou seja, a produção do concreto e do aço utilizados na estrutura, contribuem com 95% do consumo de material e 91% das emissões de CO₂ do berço à obra. A etapa de transporte contribui com apenas 1%, enquanto a obra propriamente dita contribui com 5% do consumo de material (devido sobretudo às perdas de concreto) e 8% das emissões de CO₂. Esses resultados permitem concluir, por exemplo, que para descarbonizar a estrutura em questão é muito mais importante selecionar fornecedores de concreto e aço com baixa pegada de CO₂, do que privilegiar fornecedores locais destes materiais, haja vista a baixa importância do transporte nas emissões totais de CO₂.

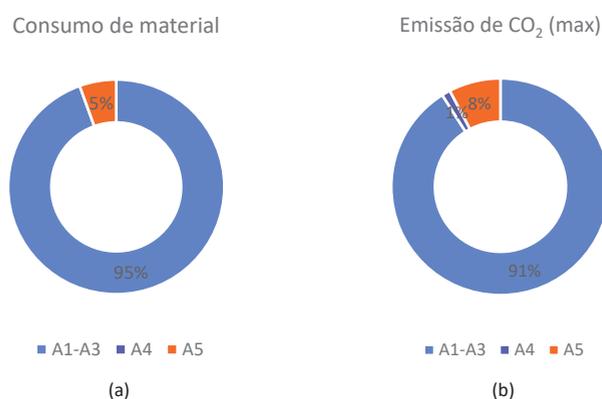


Figura 12 – Contribuição das etapas do ciclo de vida da estrutura para: a) consumo de material; b) emissão de CO₂ (as emissões de CO₂ consideram os fatores de emissão máximos de cada material).

É possível analisar também como cada insumo contribui para os indicadores de desempenho ambiental (Figura 13). Observa-se que, embora o aço represente

apenas 3% da massa total de material, ele contribui com 18% das emissões de CO_2 do berço à obra, enquanto o concreto é responsável por 96% do consumo de material e 77% da pegada de CO_2 .

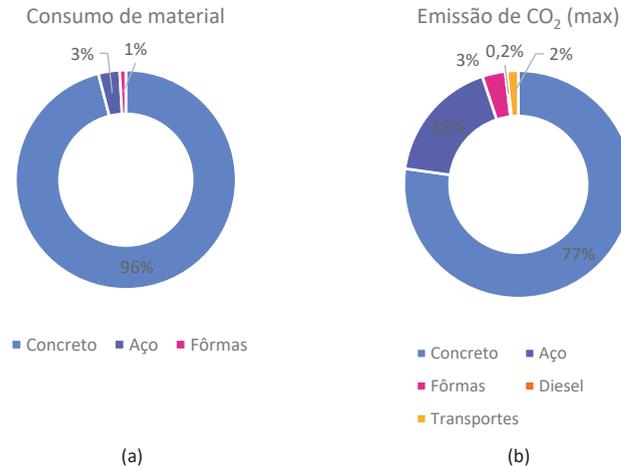


Figura 13 - Contribuição dos insumos para: a) consumo de material; b) emissão de CO_2 (as emissões de CO_2 consideram os fatores de emissão máximos de cada material).

Com base nesses resultados, para reduzir o impacto ambiental desta estrutura em questão, é necessário reduzir as emissões de CO_2 associadas ao concreto e ao aço, seja reduzindo seu consumo por meio da otimização do projeto [23], seja selecionando fornecedores com menor emissão de CO_2 , ou ambos conjuntamente. No que diz respeito à otimização do projeto, pode-se comparar os indicadores obtidos para esta estrutura com benchmarks, por exemplo, o benchmark de intensidade de material e emissões de CO_2 incorporadas em estruturas de concreto armado moldadas in-loco de edifícios residenciais localizados na cidade de São Paulo [25]. A Figura 14 apresenta essa comparação. Consideraram-se apenas os edifícios na faixa de altura equivalente ao analisado (21-30 pavimentos) e compararam-se apenas os indicadores das etapas A1-A3 (berço ao portão) para garantir uma comparação adequada.

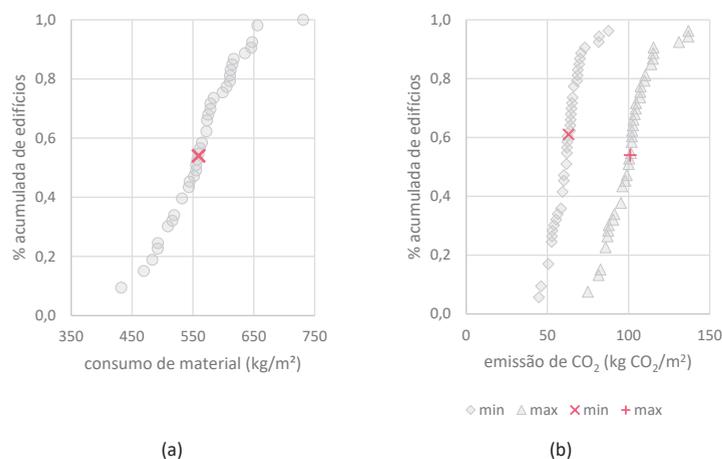


Figura 14 – Comparação dos indicadores de desempenho ambiental (do berço ao portão) obtidos para a estrutura de concreto armado e benchmark [25] para a) consumo de material e b) emissões incorporadas de CO_2 . Consideraram-se apenas os edifícios com altura entre 21 e 30 pavimentos no benchmark para permitir uma comparação adequada.

Observa-se que aproximadamente 55% das estruturas do benchmark apresentam consumo de material por m² inferior à estrutura em questão, o que indica haver potencial para sua desmaterialização. O mesmo se observa para as emissões incorporadas de CO₂. Podem ser efetuadas comparações adicionais, como da espessura média de concreto (que no caso é de 0.23m) e da taxa de aço (que no caso é de 80 kg/m³).

Além disso, pode ser útil analisar a contribuição dos diferentes elementos estruturais para os indicadores de desempenho ambiental, como mostra a Figura 15. Observa-se que o elemento que mais contribui são as lajes, seguidas pelos pilares. Tais informações podem apoiar decisões no sentido de reduzir o consumo de material e emissões de CO₂ da estrutura em questão.

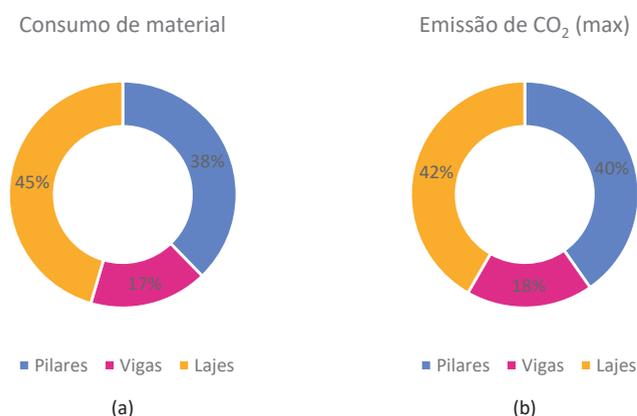


Figura 15 – Contribuição dos diferentes elementos estruturais para a) consumo de material; b) emissões de CO₂ (do berço à obra). As emissões de CO₂ consideram os fatores de emissão máximos de cada material.

13. Conclusão

O presente documento apresenta orientações sobre como realizar o cálculo das emissões de CO₂ incorporadas em materiais cimentícios e em estruturas de concreto, além de orientar sobre o cálculo do consumo de material em estruturas de concreto. Espera-se que o cálculo de tais indicadores possa apoiar os profissionais do setor de concreto em suas decisões diárias, tais como a formulação de materiais, o projeto de estruturas, a escolha de sistemas construtivos, entre outros. Além disso, espera-se que, ao fornecer orientações harmonizadas sobre como calcular indicadores de desempenho ambiental, este documento contribua para o aumento da quantidade de análises de desempenho ambiental em âmbito nacional e, conseqüentemente, para a maior disponibilidade de indicadores de desempenho ambiental de materiais e estruturas brasileiros.

14. Bibliografia

- [1] SEEG, Sistema de Estimativa de Emissões de Gases do Efeito Estufa, (2022). <https://plataforma.seeg.eco.br/>.
- [2] IStructE, How to calculate embodied carbon, 2nd ed., The Institution of Structural Engineers (IStructE), London, 2022.

- [3] J. Hart, B. D'Amico, F. Pomponi, Whole life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures, *J. Ind. Ecol.* 25 (2021) 403–418. <https://doi.org/10.1111/jiec.13139>.
- [4] GCCA, GNR 2.0 - GCCA in numbers, (2024). <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>.
- [5] C. De Wolf, E. Hoxha, A. Hollberg, C. Fivet, J. Ochsendorf, Database of Embodied Quantity Outputs: Lowering Material Impacts Through Engineering, *J. Archit. Eng.* 26 (2020). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000408](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000408).
- [6] D. Collings, Carbon footprint benchmarking data for buildings, *Struct. Eng.* 98 (2020) 10–13. <https://doi.org/10.56330/TFOG9016>.
- [7] RICS, Whole life carbon assessment for the built environment, 2nd ed., Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), London, 2023.
- [8] ABNT, ABNT NBR 15575-1 - Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais, (2024).
- [9] ABNT, ABNT NBR ISO 14025 - Rótulos e declarações ambientais - Declarações ambientais de Tipo III - Princípios e procedimentos, (2015).
- [10] ABNT, ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura, (2009).
- [11] ABNT, ABNT NBR 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações, (2009).
- [12] F. Belizario-Silva, Proposal of life cycle-based environmental performance indicators for decision-making in construction., Universidade de São Paulo, 2022. <https://doi.org/10.11606/T.3.2022.tde-31102022-091740>.
- [13] F. Belizario-Silva, L.S. Oliveira, D.C. Reis, A. Coser, G. Pato, O. Yoshida, C. Degani, K. Punhagui, S. Pacca, V. John, Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção - Metodologia, Sidac, São Paulo, 2022.
- [14] DIN, DIN EN 15804 - Sustainability of construction works - Environmental Product Declarations - Core rules for the product category of construction products, DIN, Berlin, 2022.
- [15] DIN, DIN EN 15978 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method, DIN, Berlin, 2012.
- [16] DIN, DIN EN 16757 - Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Produktkategorieregeln für Beton und Betonelemente, (2023).
- [17] DIN, DIN EN 16908 - Zement und Baukalk - Umweltproduktdeklarationen - Produktkategorieregeln in Ergänzung zu EN 15804, (2022).
- [18] ISO, ISO 15392 - Sustainability in buildings and civil engineering works - General principles, (2019).
- [19] ISO, ISO 21678 - Sustainability in buildings and civil engineering works - Indicators and benchmarks - Principles, requirements and guidelines, (2020).
- [20] ISO, ISO 21930 - Sustainability in building and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services, (2017).
- [21] IPCC, Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change - Full Report, 2022.
- [22] S. Lasvaux, F. Achim, P. Garat, B. Peuportier, J. Chevalier, G. Habert, Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters?, *Ecol. Indic.* 67 (2016) 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.056>.
- [23] R.C. Bento, Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado : Uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento, Universidade de São Paulo, 2016.
- [24] PCI, Suitability of Environmental Product Declarations in Material Selection - PCI designer's notebook, (n.d.).
- [25] F. Belizario-Silva, D. Costa Reis, M. Carvalho, R. Leopoldo e Silva França, V.M. John, Material intensity and embodied CO2 benchmark for reinforced concrete structures in Brazil, *J. Build. Eng.* 82 (2024) 108234. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108234>.
- [26] EPE, Balanço Energético Nacional 2022 - Ano Base 2021, EPE, Brasília, 2022.
- [27] IPCC, EFDB - Emission Factor Database, (2021). <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>.

- [28] L. Hanle, P. Maldonado, E. Onuma, M. Tichy, H.G. Oss, V.O. Aume, G.H. Edwards, M.M. Miller, Mineral Industry Emissions, in: 2006 IPCC Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent. Vol. 3 Ind. Process. Prod. Use, IPCC, Kanagawa, 2006.
- [29] L.S. Oliveira, S.A. Pacca, V.M. John, Variability in the life cycle of concrete block CO₂ emissions and cumulative energy demand in the Brazilian Market, *Constr. Build. Mater.* 114 (2016) 588–594. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.134>.
- [30] A. Hollberg, T. Lützkendorf, G. Habert, Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process, *Build. Environ.* 153 (2019) 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.026>.

15. Anexo A – Desdobramento da emissão de CO₂ nas etapas A1, A2 e A3

As equações a seguir apresentam como realizar o cálculo do indicador da emissão de CO₂ do estágio de produto, para cada etapa do ciclo de vida separadamente.

$$C_{A1-A3} = C_{A1} + C_{A2} + C_{A3} \quad (\text{Equação 44})$$

$$C_{A1} = C_{mat,A1} + C_{ele,A1} \quad (\text{Equação 45})$$

$$C_{mat,A1} = \sum_i (q'_{mat,i,A3} \times c_{mat,i,A1}) \quad (\text{Equação 46})$$

$$C_{ele,A1} = q_{ele,A3} \times c_{ele,A1} \quad (\text{Equação 47})$$

$$C_{A2} = \sum_i \left(q'_{i,A3} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 48})$$

$$C_{A3} = C_{comb,A3} + C_{calc,A3} + C_{perdas,A3} \quad (\text{Equação 49})$$

$$C_{comb,A3} = \sum_i (q_{comb,i,A3} \times c_{comb,i}) \quad (\text{Equação 50})$$

$$C_{calc,A3} = \sum_i (q_{calc,i,A3} \times c_{calc,i}) \quad (\text{Equação 51})$$

$$C_{perdas,A3} = C_{A3,A1} + C_{A3,A2} + C_{A3,C2} + C_{A3,C3-C4} \quad (\text{Equação 52})$$

$$C_{A3,A1} = \sum_i (q''_{mat,i,A3} \times c_{mat,i,A1}) \quad (\text{Equação 53})$$

$$C_{perdas,A2} = \sum_i \left(q''_{i,A3} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 54})$$

$$C_{perdas,C2} = \sum_i \left(q_{res,i,A3} \times \frac{m_i}{1000} \times d_{tr,i} \times c_{tr,i} \right) \quad (\text{Equação 55})$$

$$C_{perdas,C3-C4} = \sum_i (q_{res,i,A3} \times c_{res,i,C3-C4}) \quad (\text{Equação 56})$$

Onde:

- C_{A1-A3} : emissão de CO₂ do material do berço ao portão da fábrica (kg CO₂/UF);
- C_{A1} : emissão de CO₂ associada aos processos a montante de fabricação de materiais processados (sem perdas) e geração externa de energia elétrica (kg CO₂/UF);
- $C_{mat,A1}$: emissão de CO₂ associada à fabricação de materiais processados (kg CO₂/UF);
- $q'_{mat,i,A3}$: quantidade do material processado “i” consumida no processo de fabricação (etapa A3), **sem** perdas (UD_i/UF);
 - $c_{mat,i,A1}$: fator de emissão de CO₂ do material processado “i” referente à sua produção (etapa A1)ⁱ (kg CO₂/UD_i).

ⁱ Etapa A1 na perspectiva do fabricante de um produto de construção que consome o material processado no seu processo de produção; na perspectiva do fornecedor do material processado, seriam as etapas A1-A3.

- $C_{ele,A1}$: emissão de CO₂ associada à geração externa de energia elétrica consumida na fábrica (kg CO₂/UF);
 - $q_{ele,A3}$: quantidade de energia elétrica consumida no processo de fabricação (etapa A3) (kWh/UF);
 - $c_{ele,A1}$: fator de emissão de CO₂ da energia elétrica gerada externamente (kg CO₂/kWh).

- C_{A2} : emissão de CO₂ associada ao transporte de todos os insumos (kg CO₂/UF), sem perdas:
 - q'_{iA3} : quantidade do insumo transportado “i” consumida no processo de fabricação (etapa A3), **sem** perdas (UD_i/UF). Insumos transportados incluem recursos materiais, materiais processados, combustíveis e água (no caso de água de caminhão pipa);
 - m_i : fator de conversão em massa do item “i” (kg/UD_i);
 - d_{tri} : distância de transporte do item “i” (km);
 - c_{tri} : fator de emissão de CO₂ do modo de transporte adotado para o item “i” (kg CO₂/(t.km)).

- C_{A3} : emissão de CO₂ associada ao processo de fabricação (kg CO₂/UF);
- $C_{comb,A3}$: emissão de CO₂ associada aos combustíveis utilizados no processo de fabricação (kg CO₂/UF);
 - $q_{comb,iA3}$: quantidade unitária do combustível “i” consumida no processo de fabricação (etapa A3) (UD_i/UF);
 - $c_{comb,i}$: fator de emissão de CO₂ do combustível “i” (kg CO₂/UD_i).

- $C_{calc,A3}$: emissão de CO₂ associada à calcinação no processo de fabricação (kg CO₂/UF);
 - $q_{calc,iA3}$: quantidade unitária do carbonato “i” consumida no processo de fabricação (etapa A3) (UD_i/UF);
 - $c_{calc,i}$: fator de emissão de CO₂ da calcinação do carbonato “i”.

- $C_{perdas,A3}$: emissão de CO₂ associada às perdas de material no processo de fabricação (kg CO₂/UF);
- $C_{A3,A1}$: emissão de CO₂ associada à fabricação dos materiais processados desperdiçados no processo de fabricação (kg CO₂/UF);
 - $q''_{mat,iA3}$: quantidade do material processado “i” desperdiçada no processo de fabricação (etapa A3) (UD_i/UF).

- $C_{A3,A2}$: emissão de CO₂ associada ao transporte dos materiais desperdiçados no processo de fabricação (kg CO₂/UF);
 - q''_{iA3} : quantidade do material “i” (recurso material ou material processado) desperdiçada no processo de fabricação (etapa A3) (UD_i/UF).

- $C_{A3,C2}$: emissão de CO₂ associada ao transporte dos resíduos decorrentes de materiais desperdiçados no processo de fabricação até seu local de disposição final (kg CO₂/UF);

- $q_{res,i,A3}$: quantidade do resíduo “i” gerada no processo de fabricação (UD_i/UF);
- $d_{tr,i}$: distância de transporte do resíduo “i” até seu local de destinação (km).
- $C_{A3,C3-C4}$: emissão de CO₂ associada ao processamento para reciclagem (C3) e/ou disposição final (C4) dos resíduos decorrentes de materiais desperdiçados no processo de fabricação (kg CO₂/UF);
- $c_{res,i,C3-C4}$: fator de emissão de CO₂ referente à disposição do resíduo “i” (kg CO₂/UD_i).

16. Anexo B – Procedimento alternativo para propagação de incertezas

O procedimento simplificado indicado neste documento recomenda o cálculo dos valores extremos do indicador de emissão de CO₂, considerando valores mínimos e máximos para as quantidades dos insumos e para os seus respectivos fatores de emissão de CO₂. Entretanto, por vezes, tal procedimento pode resultar em uma faixa excessivamente ampla para o indicador de emissão de CO₂ – vale lembrar que a probabilidade de que todos os fatores utilizados no cálculo assumam simultaneamente seu valor mínimo ou seu valor máximo costuma ser muito baixa.

Sendo assim, a seguir, apresenta-se um procedimento alternativo para propagação de incertezas, baseado na expansão de série de Taylor de 1ª ordemⁱ. As equações a seguir descrevem a propagação de incerteza considerando apenas a variação do fator de emissão de CO₂, ou seja, as quantidades de cada item são fixas (sem variação).

$$\bar{c} = \sum_i (q_i \times \bar{c}_i) \quad (\text{Equação 57})$$

$$dp(C) = \sqrt{\sum_i (q_i^2 \times dp(c_i)^2)} \quad (\text{Equação 58})$$

Onde:

- \bar{c} : estimativa central da emissão de CO₂ do material ou estrutura (kg CO₂/UF);
- q_i : quantidade do item “i” no material ou estrutura (UD_i/UF);
- \bar{c}_i : estimativa central do fator de emissão de CO₂ do item “i” (kg CO₂/UD_i);
- $dp(C)$: desvio padrão da emissão de CO₂ do material ou estrutura;
- $dp(c_i)$: desvio padrão do fator de emissão de CO₂ do item “i”.

Observa-se que este procedimento exige que se conheça uma estimativa central para o fator de emissão de CO₂ dos produtosⁱⁱ.

ⁱ Mesmo procedimento adotado pelo Sidac para cálculo das faixas dos indicadores de desempenho ambiental.

ⁱⁱ O Sidac não informa a estimativa central dos indicadores de desempenho ambiental para evitar que este valor seja confundido com um valor médio; entretanto, é possível realizar a propagação de incertezas conforme apresentada neste Anexo ao utilizar a funcionalidade da “calculadora de produtos”, disponível gratuitamente no site do Sidac.

Patrocínio



Apoio Institucional

