



Deborah Attié

Avaliação do Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Impactos Ambientais

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Orientadora: Fernanda Salgado

Rio de Janeiro
Dezembro de 2019



Agradecimentos

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor, apoio, carinho e (muita) paciência durante todos esses anos, sem vocês não teria chegado até aqui.

Agradeço à Professora Fernanda Salgado, que me orientou e me ajudou, sempre muito prontamente, em todos os momentos em que precisei buscar soluções para este trabalho.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e ao Departamento de Engenharia Civil e Meio Ambiente pela estrutura, corpo docente e funcionários que sempre foram muito solícitos para ajudar em todo meu desenvolvimento.

Aos amigos da faculdade com quem compartilhei desafios, conhecimento, companheirismo e muitos bons momentos. Que ainda tenhamos muito a compartilhar!

Agradeço ao meu namorado, Felipe, que sempre esteve ao meu lado e que não mediu esforços para me ajudar nesse final, movimentado, do curso de Engenharia Civil.

Agradeço também aos meus amigos queridos que tiveram paciência e compreensão nessa maratona de estudos.

Por fim, meu muito obrigada a todos que, de maneira direta ou indireta, acreditaram em mim e acompanharam a minha trajetória.



Resumo

A nível global, as obras civis e a construção de empreendimentos são consideradas as principais emissoras de gases e consumidoras de energia. Por isso, ter um foco voltado para o ciclo de vida dos insumos de uma construção é tão importante atualmente. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ajuda na tomada de decisões, podendo levar a uma redução do impacto ambiental de construções. A ACV normalmente analisa os impactos ambientais produzidos nas diversas fases do processo construtivo, desde a extração e fabricação de matérias-primas até a renovação ou demolição da estrutura. Estes impactos podem ser avaliados através das emissões atmosféricas, consumo de recursos naturais, demandas energéticas e geração de resíduos sólidos e líquidos. Assim, este trabalho tem como objetivo calcular os impactos energéticos e emissão de CO₂ de uma dada edificação. Para isso faz uso da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida em um estudo de caso da construção de uma escola. Para calcular os resultados, foram adotadas diversas premissas baseadas no cenário brasileiro. Analisando tais cenários foi possível perceber que existem diversas maneiras de facilmente se alcançar uma redução de cerca de 20% nos impactos, tanto de energia quanto de emissão de CO₂. Além disso, os resultados mostraram a possibilidade de reduzir o impacto futuro em outras construções através da reciclagem de materiais.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; impacto energético; emissão de CO₂; construção; sustentabilidade



Abstract

Globally, civil works and construction are considered to be one of the main gas emitters and energy consumers. This is why having a focus on the lifecycle of the raw materials of a construction is so important today. Life Cycle Assessment (LCA) helps in decision making and can lead to reducing the environmental impact of construction. The LCA usually analyzes the environmental impacts produced in the various phases of the construction process, from the extraction and manufacture of raw materials to the renovation or demolition of the structure. These impacts can be assessed through atmospheric emissions, natural resource consumption, energy demands and solid and liquid waste generation. This paper aims to calculate the energy impacts and CO₂ emissions of a building. For this, it makes use of the Life Cycle Assessment methodology in a case study of the construction of a school. To calculate the results, several assumptions based on the Brazilian scenario were adopted. With them, it was possible to see that there are several ways to easily cause a reduction of about 20% in impacts of both energy and CO₂ emissions. In addition, the results showed that recycling can reduce the future impact on other constructions.

Keywords: Life Cycle Assessment; energy impact; CO₂ emissions; construction; sustainability



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização e Justificativa.....	1
1.2	Objetivo Geral	3
1.3	Estrutura do Trabalho.....	4
2	AValiaÇÃO DO CICLO DE VIDA	5
2.1	Definição do Objetivo e Escopo.....	7
2.2	Análise de Inventário (ICV)	13
2.3	Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV)	14
2.4	Interpretação do Ciclo de Vida	18
3	ESTUDO DE CASO	21
3.1	Detalhes da Construção	21
3.2	Etapas de Análise	21
3.3	Resultados	24
3.4	Maneiras de Reduzir o Impacto Ambiental.....	35
4	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
	ANEXOS	49



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Total de RCD coletado no Brasil e por região do Brasil.....	2
Figura 1.2: Etapas do ciclo de vida de um prédio.....	3
Figura 2.1: Processo de Avaliação do Ciclo de Vida.....	5
Figura 2.2: Fases de uma ACV	6
Figura 2.3: Passos esquemáticos do inventário até as categorias de <i>endpoint</i>	16
Figura 2.4: Esquema com os elementos da fase de interpretação e suas relações com as outras fases de um estudo ACV.....	20
Figura 3.1: Energia incorporada obtida utilizando-se os diferentes tipos de concreto	35



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Métodos de AICV e sua origem.....	17
Tabela 2.2: Comparativo dos métodos de AICV	18
Tabela 3.2: Percentual de perda de material no Brasil.....	37
Tabela 3.3: Percentual de perda de materiais específicos no Brasil	37
Tabela 3.4: Perda de material na Holanda	38
Tabela 3.5: Cenários analisados.....	39



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráficos 3.1: Energia incorporada total – cenário base	26
Gráfico 3.2: Emissão de CO ₂ incorporada total – cenário base	26
Gráfico 3.3: Impactos por aluno	27
Gráfico 3.4: Impactos por m ²	27
Gráfico 3.5: Energia incorporada por etapa da obra	28
Gráfico 3.6: Energia incorporada na Produção	29
Gráfico 3.7: Energia incorporada na Manutenção	30
Gráfico 3.8: Emissão incorporada por etapa da obra	31
Gráfico 3.9: Emissão incorporada na Produção	32
Gráfico 3.10: Emissão incorporada na Manutenção	33
Gráfico 3.11: Energia incorporada total (com coeficientes)	34
Gráfico 3.12: Emissão de CO ₂ incorporada total (com coeficientes)	34
Gráfico 3.13: Impactos sem fim de vida <i>versus</i> com fim de vida (com coeficientes)	34
Gráfico 3.14: Impacto cenário base <i>versus</i> cenário 2	40
Gráfico 3.15: Impacto cenário base <i>versus</i> cenário 3	41
Gráfico 3.16: Impacto cenário base <i>versus</i> cenário 4	41
Gráfico 3.17: Cenário base <i>versus</i> cenário 5	42
Gráfico 3.18: Energia incorporada e benefícios em cada cenário	43
Gráfico 3.19: Emissão incorporada e benefícios em cada cenário	44



1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Justificativa

Segundo a ONU (Organização das Nações Unidas), o desenvolvimento sustentável é definido como “aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”. Este conceito foi introduzido em 1987 pela Comissão Brundtland no relatório “Nosso Futuro Comum”.

A preocupação da sustentabilidade ganhou corpo na década de 1950, quando a sociedade percebeu um risco ambiental global, a poluição nuclear. Em função desse e de outros eventos, a realização da Conferência de Estocolmo (1972), envolvendo 113 países, foi aprovada. Como consequência dessa reunião, os governos participantes criaram agências que passaram a se ocupar da questão ambiental, como por exemplo a EPA (*Environmental Protection Agency*) dos Estados Unidos e a Sema (Secretaria Especial do Meio Ambiente) no Brasil.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se destaca como uma ferramenta que permite avaliar o impacto ambiental potencial associado à um produto ou atividade durante a sua vida útil. A ACV permite analisar os estágios do ciclo de vida e fazer escolha de alternativas, a partir de um inventário de entradas e saídas do sistema considerado (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006).

Porém, nos primeiros anos da sua utilização, muitos estudos de ACV chegavam a conclusões diferentes devido às fronteiras adotadas, as considerações feitas, os dados coletados e as tecnologias utilizadas. Por isso, houve a necessidade de padronizar a metodologia da ACV. Assim, a SETAC – *Society of Environmental Toxicology and*

Chemistry reuniu pesquisadores líderes na área para discutir o tema. A partir de diversas conferências, o primeiro documento voltado à padronização da metodologia da ACV foi publicado e chamado de “*SETAC Guidelines for Life Cycle Assessment – a Code of Practice*”. Foi a partir desse documento que, mais tarde, a série de normas ISO 14040, relacionadas à ACV, foram geradas (COLTRO, 2007).

Com relação à construção civil, a geração do resíduo da construção e demolição (RCD) tem crescido progressivamente nos últimos anos e, quando não gerenciado propriamente, estes resíduos podem causar um grande impacto nas atividades ambientais, econômicas e sociais. Segundo a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) (ABRELPE, 2013), foram produzidos, aproximadamente, 37 milhões de toneladas de RCD no Brasil, em 2013. Essa quantidade representa cerca de 48% da massa total de resíduos sólidos urbanos.

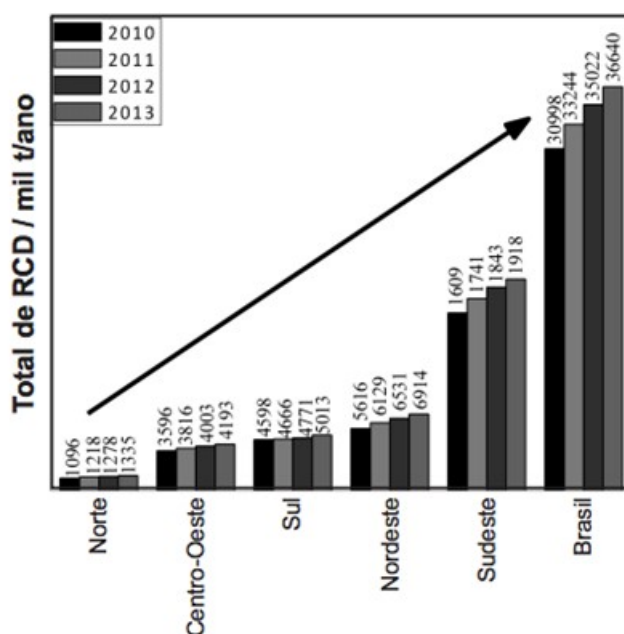


Figura 1.1: Total de RCD coletado no Brasil e por região do Brasil.
Fonte: ABRELPE (2013)

Tendo isso em mente, a ACV de edificações tem sido gradualmente utilizada para identificar os melhores cenários para gestão de resíduos, que podem prevenir ou reduzir os impactos negativos nos ecossistemas, recursos humanos e saúde humana (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2015).

As etapas do ciclo de vida de uma edificação são a Produção, a Construção, a Manutenção e Demolição/Fim de Vida. Além desses estágios, há os potenciais benefícios como reciclagem e reuso (Figura 1.2).

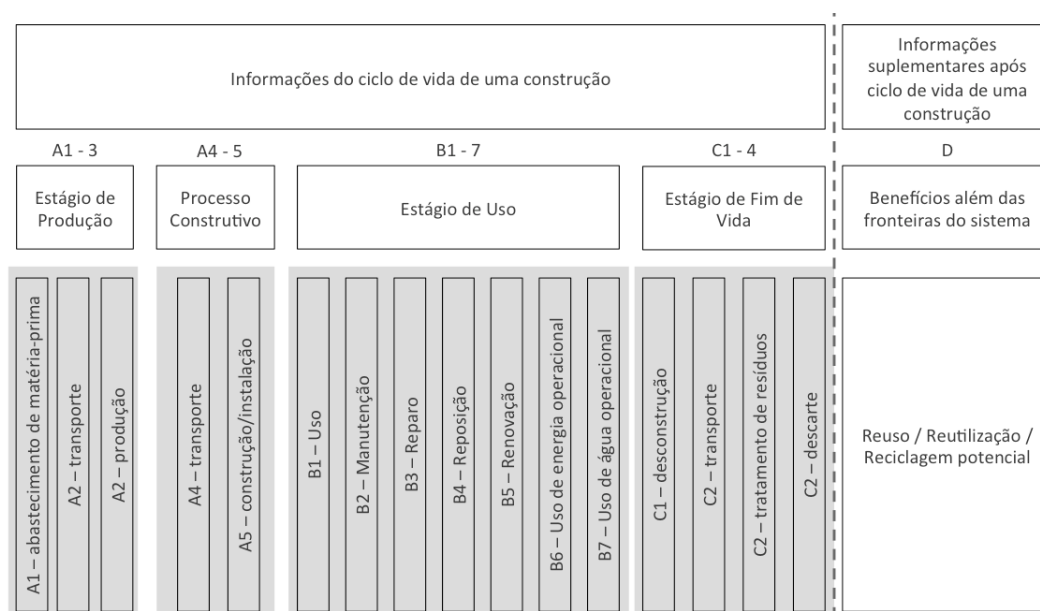


Figura 1.2: Etapas do ciclo de vida de um prédio
Fonte: Adaptado de BRITISH STANDARDS INSTITUTION (2011)

É nesse contexto que se enquadra esta pesquisa, que busca analisar os impactos ambientais de uma construção e comparar cenários, através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos ambientais utilizando a ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para isso, essa metodologia será



aplicada em um estudo de caso da construção de uma escola buscando identificar as categorias de impacto com contribuições mais significativas e os recursos para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente.

A proposta da escola pode ser encontrada na página do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE). É chamado de projeto Espaço Educativo Urbano de 12 Salas de Aula e tem como objetivo orientar para a construção de uma escola de um pavimento, a fim de ser implantada nas diversas regiões do Brasil (FNDE).

1.3 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta uma breve contextualização do tema estudado e a justificativa da pesquisa, além do objetivo do trabalho e sua estruturação.

O Capítulo 2 trata da definição da Avaliação do Ciclo de Vida e sua metodologia.

O Capítulo 3 é composto pela aplicação da ACV em um estudo de caso. São apresentados os impactos ambientais do ciclo de vida de uma escola através da quantificação de materiais e obtenção de dados por meio do uso da base de dados *Ecoinvent* (coeficientes de impacto).

O Capítulo 4 apresenta as considerações finais, com base na teoria e nos resultados alcançados, além de comentar sobre as principais recomendações a trabalhos futuros e limitações da pesquisa.

2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite avaliar os impactos ambientais potenciais de um sistema de produto durante seu ciclo de vida, ou seja, desde a extração dos recursos naturais até o uso e disposição final do produto (Figura 2.1). Este método viabiliza identificar quais estágios do ciclo de vida contribuem mais expressivamente para o impacto ambiental do produto avaliado. Ao aplicar a ACV, “é possível avaliar a implementação de melhorias ou alternativas para produtos, processos ou serviços” (COLTRO, 2007).

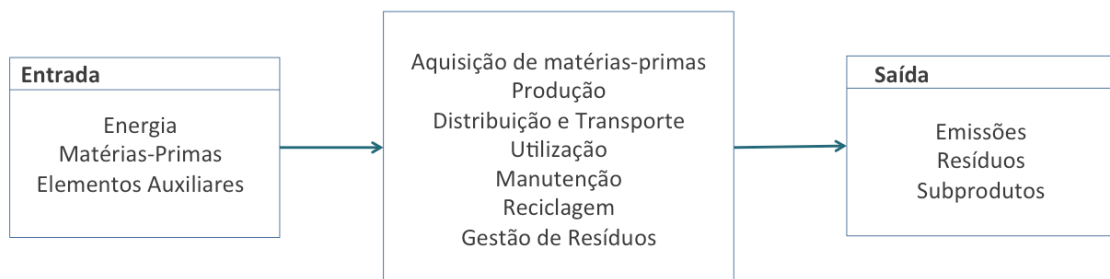


Figura 2.1: Processo de Avaliação do Ciclo de Vida
Fonte: adaptado de REVISTA ESPACIOS (2011)

A sugestão da norma ABNT NBR ISO 14040:2009 para um estudo de ACV inclui quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impactos de ciclo de vida (AICV) e interpretação de resultados (Figura 2.2).

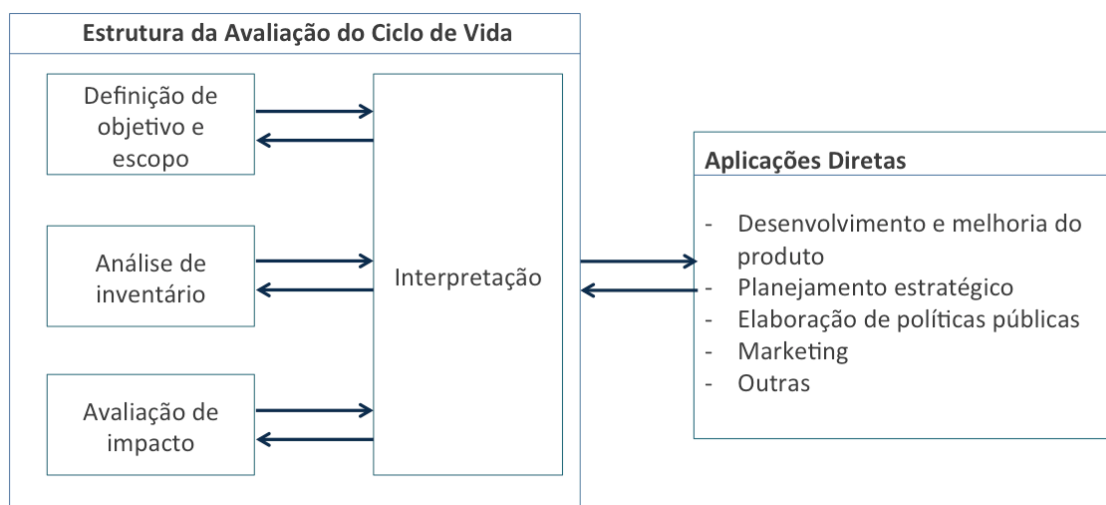


Figura 2.2: Fases de uma ACV
 Fonte: adaptado de ABNT (2009)

De maneira resumida, na primeira etapa é definido o objetivo do estudo, as fronteiras do sistema e a unidade funcional. Já a fase de análise de inventário, que é a segunda fase de uma ACV, envolve coletar os dados necessários para o estudo e avaliar as entradas e saídas relevantes para o sistema. Na fase seguinte, de avaliação de impacto, os dados gerados na análise de inventário são associados a impactos ambientais específicos, para que estes impactos possam ser avaliados. E, na última fase, os resultados obtidos anteriormente são combinados e interpretados de acordo com os objetivos definidos no início do estudo (COLTRO, 2007). Cada uma destas fases será descrita nos itens a seguir.

Neste trabalho, como base para a definição das fases de um estudo de ACV, será utilizado o guia geral de Avaliação do Ciclo de Vida proposto pelo ILCD Handbook – *International Reference Life Cycle Data System* (EC JRC, 2010). É importante observar que esse guia se baseia nas normas ISO 14040:2006 e 14044:2006.



2.1 Definição do Objetivo e Escopo

2.1.1 Definição do Objetivo

A definição do objetivo de uma ACV é essencial para todas as outras fases da avaliação. Nessa etapa deve ser especificado “por quê” e “como” o estudo está sendo realizado e quais serão as aplicações dos resultados obtidos (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

A definição do objetivo auxilia no detalhamento de informações para as próximas etapas. Além disso, o controle de qualidade do trabalho é praticado em vista dos requerimentos derivados do propósito do estudo. Além disso, caso o projeto seja mais do que apenas um estudo de ICV, os resultados finais da ACV são avaliados e interpretados, algo que também deve estar em estreita ligação com o objetivo do trabalho.

Seis aspectos devem ser abordados e documentados durante a definição do objetivo:

- Aplicações pretendidas dos resultados;
- Limitações devido ao método, suposições e cobertura de impacto;
- Razões para a realização do estudo e contexto de decisão;
- Público-alvo;
- Comparações pretendidas a serem divulgadas ao público;
- Encarregados do estudo e outros atores influentes.

2.1.1.1 Aplicações Pretendidas

Há dois tipos de aplicações possíveis para este tipo de estudo. O primeiro está relacionado à tomada de decisão e contabilidade/monitoramento. Nesse caso, a



aplicação é combinada com diversos fatores, como custos, aspectos sociais, e informações ambientais complementares. Cada aplicação solicita uma abordagem metodológica diferente.

O outro é um estudo puramente metodológico sem levar em conta os outros fatores mencionados anteriormente. Nesse caso, é possível utilizar todas as metodologias livremente. Por esse motivo, existe a possibilidade do estudo não estar de acordo com os requerimentos do ILCD e das normas ISO 14040:2006 e 14044:2006. É importante que esse fato seja explicitado no objetivo do estudo, para que este não seja considerado pelo público como uma base para tomada de decisão (EC JRC, 2010).

2.1.1.2 Limitações do Método, Suposições e Impactos

Caso a metodologia, as suposições ou a cobertura de impacto implique em alguma limitação nos resultados do estudo, elas devem ser claramente identificadas e, posteriormente, reportadas.

É importante destacar que estudos com cobertura de impacto limitada podem levar a uma inadequação para comparações. Além disso, o método escolhido pode restringir a possibilidade de utilização da avaliação em outros estudos.

Suposições sobre as características também podem limitar a usabilidade dos resultados. Por exemplo, cenários com locais e padrões singulares, reduzem a possibilidade de aplicar o estudo para outros cenários (EC JRC, 2010)

2.1.1.3 Motivações para a Realização do Estudo

Na definição do objetivo, é importante definir as razões para a realização do estudo e suas motivações, além de identificar o contexto de decisão. Caracterizar esse



contexto é um critério chave para determinar os métodos mais apropriados para o modelo de ICV, para estabelecer as decisões a serem feitas durante a coleta de dados e modelagem, para calcular os resultados da avaliação de impacto e para a interpretação de resultados.

2.1.1.4 Público-alvo

A definição do público-alvo serve para ajudar a identificar as exigências de revisão crítica, a maneira apropriada de apresentar o estudo e o nível técnico necessário. Tipos diferentes de público-alvo costumam implicar em diferentes requerimentos na documentação, revisões, confidencialidade e outros aspectos derivados das necessidades do público.

2.1.1.5 Comparações Pretendidas a serem Divulgadas ao Público

Nessa etapa, deve ser explicitado se o estudo de ACV inclui uma declaração comparativa direcionado ao público. Caso afirmativo, deve ser indicado de forma clara “o estudo inclui uma afirmação afirmativa e é previsto para ser divulgado ao público”.

Este aspecto acarreta em uma série de requerimentos adicionais obrigatórios de acordo com as normas NBR ISO 14040 (ISO 14040, 2006) e (ISO 14044, 2006) na execução, documentação, revisão e reporte do estudo ACV devido às consequências potenciais que os resultados possam ter para, por exemplo, empresas externas, instituições, consumidores, entre outros.

Destaca-se também, que de acordo com a ISO 14044 (ISO 14044, 2006), um estudo de ICV sozinho não deve ser usado para comparações assertivas divulgadas ao público, deve ser realizado, juntamente, uma avaliação e interpretação da avaliação.



2.1.1.6 Encarregados do Estudo e Outros Atores Influentes

Deve ser identificado quem encomendou o estudo de ACV, além de todos os financiadores e outras organizações que tiveram alguma influência relevante no estudo. Deve ser incluído os especialistas de ACV que irão realizar o estudo.

2.1.2 Definição do Escopo

Durante a definição do escopo, o produto ou sistemas que serão analisados devem ser claramente identificados e definidos. Importante que, nesta etapa, as metodologias, qualidade, reporte e revisão estejam de acordo com o objetivo do estudo.

Os principais itens que precisam ser descritos são:

- Tipo de entrega do estudo de ACV, em linha com a aplicação pretendida;
- Sistema ou processo que será estudado e suas funções, unidade funcional e fluxos de referência;
- Estrutura da modelagem do ICV e manipulação dos processos multifuncionais e produtos;
- Fronteiras do sistema;
- Categorias de impacto selecionadas e metodologia aplicada
- Outros requisitos de qualidade de dados a respeito da adequação tecnológica, geográfica e temporal;
- Tipos, qualidade e fontes da informação necessária e a precisão necessária e incertezas permitidas;



- Requerimentos especiais para comparações entre sistemas;
- Identificar a necessidade de revisões críticas;
- Planejar o relatório de resultados.

Como apenas os itens fronteiras do sistema e a unidade funcional são os mais comentados na norma ABNT ISO 14040:2009, serão apresentados em detalhe apenas estes mesmos dois tópicos.

2.1.2.1 Fronteiras do Sistema

As fronteiras do sistema definem quais etapas do ciclo de vida e processos farão parte do sistema analisado. É importante definir precisamente as fronteiras do sistema para assegurar que todos os processos atribuíveis e consequentes sejam realmente incluídos no sistema modelado e que todos os potenciais impactos ambientais estejam propriamente cobertos.

Destaca-se que a ACV contabiliza apenas impactos relacionados à operação de produtos e processos, mas não de impactos gerados por acidentes, derramamentos e similares. Impactos na saúde das pessoas também não é coberto pela ACV. Isto porque esses impactos ocorrem na tecnosfera (abrange as estruturas constituídas pelo trabalho humano no espaço da biosfera) e não estão sujeitos a nenhum destino ambiental e da cadeia de exposição. Caso sejam incluídos, devem ser inventariados, agregados e interpretados separadamente dos inventários do ciclo de vida.

Delimitar o sistema significa decidir quais estágios do ciclo de vida, tipos de atividades, processos específicos e fluxos elementares deverão ser inclusos e quais



deverão ser desconsiderados do modelo de ciclo de vida. Alguns deles são (ABNT, 2009):

- Aquisição de matérias-primas;
- Entradas e saídas na cadeia principal de manufatura/processamento;
- Distribuição/transporte;
- Produção e uso de combustíveis, eletricidade e calor;
- Uso e manutenção de produtos;
- Disposição final de resíduos de processos e de produtos;
- Recuperação de produtos usados (incluindo reuso, reciclagem e recuperação de energia);
- Manufatura de materiais auxiliares;
- Manufatura, manutenção e desativação de equipamentos;
- Operações adicionais, como iluminação e aquecimento.

2.1.2.2 Unidade Funcional

Na definição do escopo é decidido quais serão as possíveis funções do sistema estudado. A unidade funcional define como quantificar as características de desempenho do produto e tem como propósito fornecer uma unidade de referência para o estudo. Ou seja, todas as entradas e saídas são relacionadas pela unidade adotada. É importante que esta unidade seja bem definida e mensurável para assegurar a comparabilidade dos resultados da ACV (ABNT, 2009). Como exemplo, a unidade funcional de um sistema de pintura pode ser definida como a unidade de superfície protegida por um período de tempo especificado (ABNT NBR ISO 14040:2001).



2.2 Análise de Inventário (ICV)

Na fase de Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), deve ser feita a coleta dos dados e realizar a modelagem do sistema, sempre satisfazendo os requisitos decididos na fase anterior. Normalmente, a análise de ICV requer o maior esforço e recursos do estudo para coletar dados, aquisição e modelagem.

Esta etapa é indispensável para avaliar quantitativamente os impactos ambientais, ao “colocar em evidência certos fatores de alterações ambientais (fatores de impacto) como, por exemplo, o consumo de recursos naturais (matérias-primas e energia), os resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) e outras emissões.” (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006).

A fase de inventário envolve a coleta de dados para os fluxos de entrada e saída dos processos, como os fluxos elementares, os de produtos e os de resíduos. Além disso, é feita a coleta de outros dados considerados relevantes para o sistema analisado, como dados estatísticos, características dos processos e dos produtos.

O tipo específico do ICV depende das entregas pretendidas do estudo, e nem todas as etapas são exigidas para todos os tipos de estudo. Mas, de forma geral, o inventário de ciclo de vida significa:

- Identificar os processos necessários para o sistema;
- Planejar a coleta de dados primários e os de fontes secundárias;
- Coletar os dados de primeiro plano do sistema para os processos solicitados;
- Desenvolver dados de ICV genéricos;
- Obter dados complementares como processos da unidade;



- Gerar a média dos dados de ICV ao longo do processo, incluindo para produção em desenvolvimento, fornecimento e consumo;
- Modelar o sistema ao conectar os conjuntos de dados corretamente, para que o sistema forneça sua unidade funcional;
- Resolver as multifuncionalidades dos processos do sistema;
- Calcular os resultados do ICV.

2.3 Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV)

A fase de Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida é o momento em que os dados que foram coletados e reportados no inventário são traduzidos em indicadores de impactos, trazendo resultados relacionados à saúde humana, meio ambiente e esgotamento dos recursos.

É importante notar que fazer uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) e uma Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida significa analisar os potenciais impactos ambientais que são causados por intervenções que cruzam a fronteira entre a tecnosfera e a ecosfera e atuam no meio ambiente e humanos. Os resultados da AICV devem ser vistos como relevantes indicadores de impactos ambientais, ao invés de previsões de atuais efeitos ambientais.

É importante ressaltar que mesmo que o estudo da ACV não exija reportar um resultado da avaliação de impactos, ainda é relevante realizar uma avaliação de impacto a partir dos dados do estudo. Isso se deve ao fato de que o nível de precisão e integridade atingido pelo estudo depende dos resultados da AICV.

Usando os métodos de AICV identificados na fase do escopo do estudo, os resultados devem ser calculados. Apesar de que a norma ISO 14044:2006 não especifica



qual o método deve ser utilizado, ela formaliza a necessidade de uma conexão entre os fluxos elementares do inventário e os fatores da avaliação de impacto.

A norma comenta que primeiramente devem ser designado os fluxos elementares para um ou mais categorias de impacto relevantes. Esse passo é chamado de “Classificação”. Na próxima etapa, chamada de “Caracterização”, os resultados do inventário para fluxo individual normalmente são multiplicados linearmente com os fatores de impacto relevantes que foram aplicados no método. Como os resultados da AICV separados por categoria de impacto possuem diferentes unidades, eles não podem ser diretamente comparados para identificar quais deles são os mais relevantes. Da mesma maneira, não podem ser somados.

É necessário sempre ter em mente que, caso nesta etapa seja revelada a necessidade de adicionar outros impactos que não foram considerados originalmente, a fase de definição de escopo deve ser revisada. Ou seja, caso um fator de caracterização esteja faltando para um fluxo elementar no inventário, sua potencial importância deve ser checada. Se ela for considerada significativa, deve ser feita uma tentativa de estimar o fator de caracterização faltante. Não sendo possível fazer essa estimativa, é necessário reportar a falta deste fator e suas potenciais influências devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

De acordo com a ISO 14040:2009, a Avaliação de Impactos é composta por três grandes etapas mandatórias:

- Selecionar as categorias de impacto;
- Correlação de resultados do ICV (classificação);
- Cálculo de resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

Além das etapas mencionadas acima, há alguns elementos opcionais que podem ser analisados, como normalização, agrupamento e ponderação.

Existem métodos de AICV para níveis *midpoint* e *endpoint*, ou ambos, em metodologias integradas de AICV (Figura 2.3). Em geral, no nível *midpoint* (“pontos intermediários”), um maior número de categorias de impacto é analisado e os resultados são mais específicos quando comparados com as de *endpoint* (“pontos finais”), as quais normalmente consideram três áreas de proteção mais abrangentes.

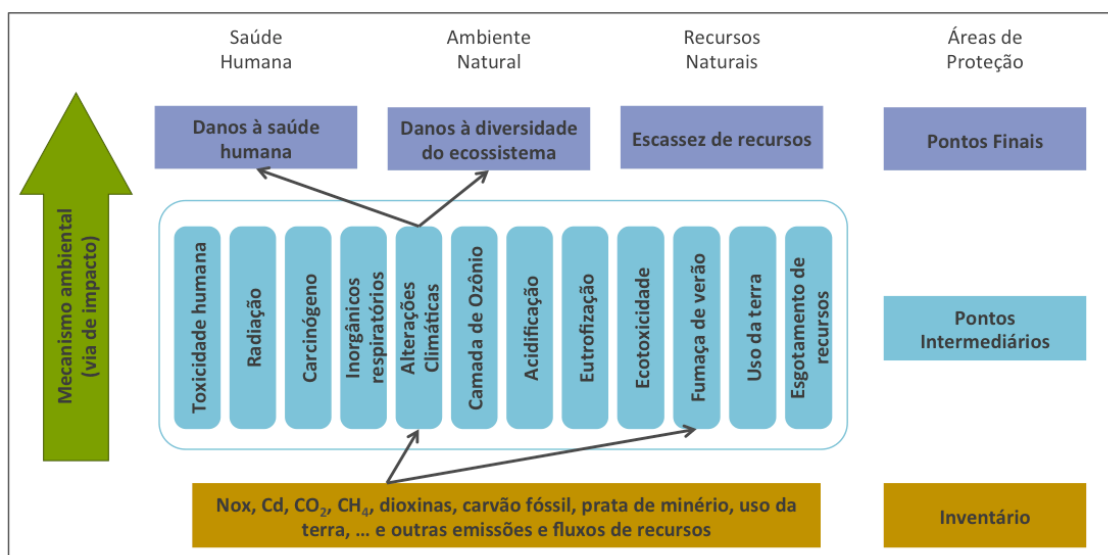


Figura 2.3: Passos esquemáticos do inventário até as categorias de *endpoint*
 Fonte: Adaptado de EC JRC (2010)

2.3.1 Métodos de AICV

De acordo com a ISO 14040:2009,

Não existem metodologias amplamente aceitas para correlacionar de forma consistente e acurada dados de inventário com impactos ambientais potenciais específicos. Modelos para categorias de impacto estão em fases diferentes de desenvolvimento.

As etapas para o estudo de uma ACV podem ser encontradas em manuais e normas, mas eles não indicam qual o método mais adequado de acordo com a avaliação.



Ao longo do tempo, diferentes abordagens foram desenvolvidas com indicadores em diferentes níveis da cadeia causa-efeito (UNEP/SETAC, 2016).

As abordagens mais utilizadas foram principalmente desenvolvidas na Europa, com aplicações realizáveis em todo o mundo (Tabela 2.1). Porém, não é possível afirmar que os procedimentos e parâmetros considerados em cada método são capazes de representar e avaliar os impactos ambientais de todas as regiões do mundo.

Tabela 2.1: Métodos de AICV e sua origem

Metodologia	Desenvolvido por	País de Origem
CML2002	CML	Holanda
Eco-indicator 99	PRé	Holanda
EDIP97 - EDIP2003	DTU	Dinamarca
EPS 2000	IVL	Suécia
Impact 2002+	EPFL	Suíça
LIME	AIST	Japão
LUCAS	CIRAIG	Canadá
ReCiPe	RUN + PRé + CML + RIVM	Holanda
Swiss Ecoscarcity 07	E2+ ESU-services	Suíça
TRACI	US EPA	USA
MEEuP	VhK	Holanda

Fonte: EC JRC (2010)

Cada metodologia faz diferentes considerações e fronteiras entre si. Abaixo, uma tabela com uma visão global dos métodos mencionados na Tabela 2.1. Em alguns métodos, os indicadores podem ser calculados ao nível *midpoint* (“micropontos”) e ao nível *endpoint* (“macropontos”). Esses níveis estão representados na tabela abaixo (Tabela 2.2) como M (*midpoint*) e E (*endpoint*). Quando utilizado ambas as letras, significa que a metodologia pode ser utilizada para o níveis intermediário e final.



Tabela 2.2: Comparativo dos métodos de AICV

Método	Alterações Climáticas	Esgotamento do Ozônio	Inorgânicos Respiratórios	Toxicidade Humana	Radiação Ionizante	Ecotoxicidade	Formação do Ozônio	Acidificação	Eutrofização Terrestre	Eutrofização Aquática	Uso da Terra	Consumo dos Recursos
CML2002				M			M	M	M	M		M
Eco-Indicator 99	E	E	E				E	E	E		E	E
EDIP97 - EDIP2003		M		M		M	M	M	M	M		M
EPS 2000	E	E	E	E		E	E				E	E
Impact 2002+			E	M		M	E	M		M		E
				E		E		E		E		
LIME	E	E	M	E			M	M		E	E	E
							E	E				
LUCAS												
ReCiPe	M E	E	M	M		M	M	M		M	M	E
			E	E		E	E	E		E	E	
Swiss Ecoscarcity 07					M	M					M	
					E						E	
TRACI			M	M		M	M	M		M		
MEEuP			M	M		M	M	M	M	M		

Fonte: adaptado de EC JRC (2010)

2.4 Interpretação do Ciclo de Vida

Baseado no ILCD Handbook, a fase de interpretação do ciclo de vida tem dois principais objetivos. O primeiro é que, durante os passos iterativos da ACV, a fase de interpretação serve para conduzir o trabalho em direção ao aprimoramento do modelo do Inventário do Ciclo de Vida para que atenda às necessidades estipuladas no objetivo do estudo. O segundo objetivo principal é que se os passos iterativos da ACV



resultaram no modelo e resultados da ICV, a fase de interpretação serve para tirar conclusões robustas e, geralmente, recomendações.

A NBR ISO 14040:2009 descreve essa fase como o momento em que são considerados em conjunto as observações da análise de inventário do ciclo de vida e da avaliação de impacto. Essa etapa tem como objetivo fornecer resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos. É importante que haja conclusões, explicação de limitações e recomendações. Além disso, a fase de interpretação do ciclo de vida “pode envolver o processo iterativo de rever e revisar o escopo da ACV, assim como a natureza e qualidade dos dados coletados, de forma consistente com o objetivo definido” (ABNT, 2009).

A interpretação é composta por três etapas (Figura 2.4):

- Identificar os quesitos importantes (exemplos: processos chave, parâmetros, suposições e fluxos elementares);
- Avaliar estes quesitos em relação à sua sensibilidade ou influência nos resultados gerais da ACV;
- Utilizar os resultados da avaliação na formulação de conclusões e recomendações para o estudo de ACV.

Importante ressaltar que, caso o estudo envolva comparação entre dois ou mais sistemas, devem ser incluídas considerações adicionais para a interpretação.

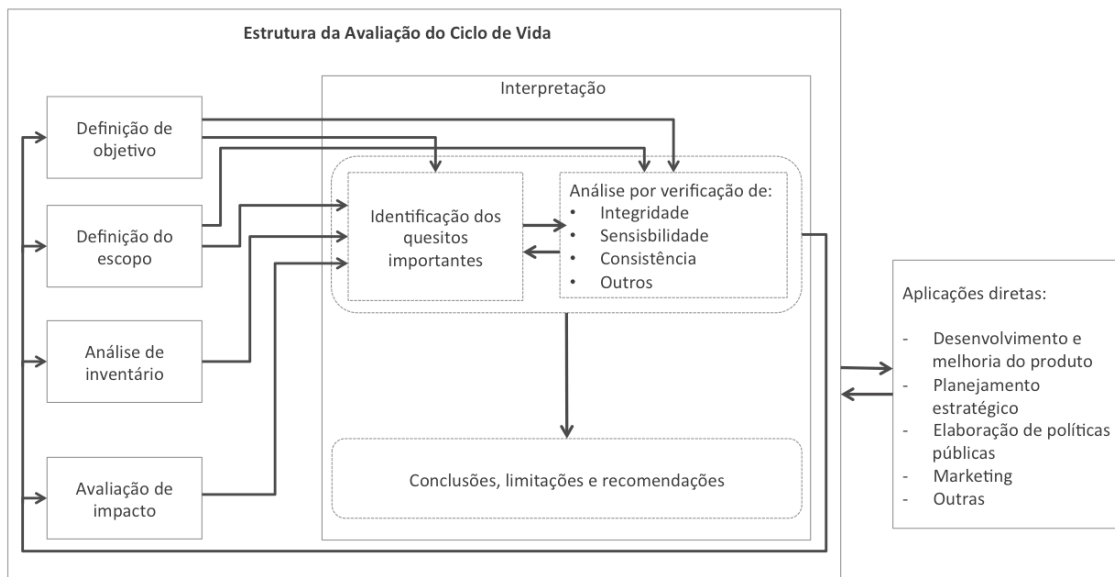


Figura 2.4: Esquema com os elementos da fase de interpretação e suas relações com as outras fases de um estudo ACV
Fonte: EC JRC (2010)



3 ESTUDO DE CASO

3.1 Detalhes da Construção

Como mencionado anteriormente, o estudo de caso será baseado no projeto para a construção de uma escola disponibilizado pelo FNDE. A edificação tem 12 salas, com capacidade de até 780 alunos divididos em dois turnos (matutino e vespertino), além de mais 390 alunos em período integral. Neste projeto, foi considerado como ideal a implantação da escola em terreno retangular com medidas de 80 m de largura por 100 m de profundidade, com declividade máxima de 3% (Portal do FNDE).

Para o estudo de caso em questão, a escola ficaria situada no endereço Rua Marquês de São Vicente, entre os números 96 e 124 – Gávea, Rio de Janeiro. Foi escolhido esta localização pelo fato de ser um terreno livre e de estar próximo à PUC-Rio.

De acordo com as recomendações técnicas do FNDE, o conjunto deve ser formado por 8 blocos distintos, separados em administrativo, pedagógico e serviços (como cozinha).

A técnica construtiva é simples, adotando materiais facilmente encontrados e sem necessidade de mão-de-obra especializada, para que facilite a construção do edifício em qualquer região do Brasil.

3.2 Etapas de Análise

Seis etapas foram envolvidas para o cálculo dos impactos ambientais da escola composta por 12 salas: produção, construção, manutenção, demolição, fim de vida e benefícios.



3.2.1 *Produção*

Esta etapa inclui a extração de insumos, o transporte e a manufatura. Nesse momento é definida a quantidade de material necessária para a realização da obra. Para o estudo de caso foi utilizada a planilha orçamentária disponibilizada pelo FNDE e relatórios com as referências em insumos e composições de serviço do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices) e da SEINFRA (Secretaria de Estado de Infraestrutura e Obras).

Além disso, é necessário estabelecer os fatores de energia e de emissão incorporados em cada material para definir o impacto ambiental dos mesmos. Os coeficientes de cada material foram retirados da base de dados ICV da *Ecoinvent* (versão 3.4), uma associação sem fins lucrativos fundada por diversos institutos do *ETH Domain* (*Domain of the Swiss Federal Institutes of Technology* – união entre universidades suíças e instituições de pesquisa).

3.2.2 *Construção*

Nesta etapa é analisada a construção e instalação do edifício, além do transporte dos materiais, tanto entre a loja e o canteiro de obras, quanto entre o canteiro de obras e o descarte (para os resíduos da obra).

Neste momento foi determinado o percentual de perda de cada material, baseado nos estudos da FINEP (1998), PINTO (1989) e AGOPYAN (1998). Juntamente com isso, foram estabelecidas as distâncias entre o canteiro de obras e a loja de materiais e o aterro. A localização da loja foi definida a partir do canteiro de obras. Pelo fato da Leroy Merlin (Barra da Tijuca) possuir todos os materiais necessários da obra, ela foi escolhida para o estudo de caso. O aterro sanitário para fazer o descarte escolhido foi o



CTR Seropédica (Centro de Tratamento de Resíduos). Atualmente todo o descarte do Rio de Janeiro vai para este aterro.

Ainda, foi definido a forma de transportar os insumos e resíduos, para que fosse calculado o impacto ambiental da construção e do transporte. Para cada meio de transporte, há um coeficiente de impacto ambiental diferente, sendo eles nas unidades MJ/km e CO₂ eq/km (BRIBIÁN *et al.*, 2011).

3.2.3 Manutenção

A etapa de manutenção engloba o uso, manutenção, reparos, reposições e reforma da edificação. Para isso, foi adotada a vida útil dos materiais de acordo com a norma ABNT NBR 15575:2013. Foi levado em conta a retirada dos materiais a serem substituídos ao longo da vida útil da estrutura (50 anos).

Neste estágio, foi considerada a possibilidade de aumentar a vida útil de esquadrias e PVC, com o intuito de analisar a variação no impacto ambiental. Foram escolhidos apenas esses dois materiais pois são de fácil acesso e não requerem muito esforço para fazer trocas, caso necessário. No caso de esquadrias por exemplo, algumas medidas a serem adotadas seriam se preocupar com o tratamento que o material recebe desde a chegada na obra até a instalação, padronizar o manuseio do produto, calcular corretamente os vãos onde as portas serão inseridas, entre outros (ABIMCI, 2018).

3.2.4 Demolição

Esta fase inclui a demolição e o transporte dos resíduos. Para isso, foi necessário considerar as distâncias entre o canteiro, aterro e centro de reciclagem, além dos coeficientes de impacto (BRIBIÁN *et al.*, 2011) da frota utilizada. O Centro de



Reciclagem Rio (CRR) escolhido foi o mais próximo do canteiro de obras, que se localiza em Guadalupe.

3.2.5 Fim de Vida

Na fase de fim de vida é feito o processamento dos resíduos, além do descarte ou destinação dos mesmos. Com base na construção civil brasileira, foi considerado que apenas 20% dos resíduos vão para reciclagem e o restante, 80%, vão para o aterro (ABRECON, 2015).

Normalmente é necessário conhecer os coeficientes de impacto dos processos de reciclagem e de descarte. No entanto, por encontrar apenas algumas referências, apenas um cenário irá considerar fim de vida, para fazer uma comparação com o cenário base. Importante ressaltar que o cenário base e os cenários chamados de 2 a 5, não levarão em conta a etapa de fim de vida.

3.2.6 Benefícios

A etapa de benefícios inclui definir qual a quantidade de material que será reutilizado e qual será reciclado. Ademais, é neste momento em que é estabelecido qual será o percentual de material reciclado que será reutilizado.

3.3 Resultados

O objetivo desse estudo é calcular o impacto ambiental estimado ao se construir uma escola e, assim, encontrar maneiras de reduzir o impacto ambiental. Nesta seção serão comentados os resultados encontrados e as possíveis variações de cenário.



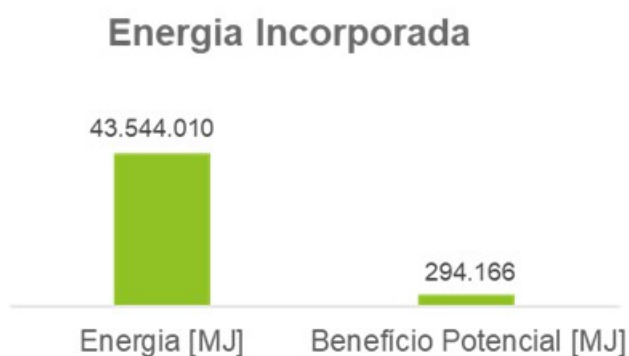
Para a Avaliação do Ciclo de Vida, foi criado um cenário base apoiado no quadro na construção civil brasileira. As premissas adotadas foram:

- Produção:
 - Coeficientes de impacto da base de dados *Ecoinvent 3.4*.
- Construção:
 - Adotado percentual de perda de acordo com a literatura (PINTO, 1989; FINEP, 1998);
 - Transporte com base na cidade do Rio de Janeiro;
 - Considerado 3,23 MJ/tonelada.km e 0,19 KgCO₂eq/tonelada.km para a análise do transporte dos insumos (BRIBIÁN *et al.*, 2011).
- Manutenção:
 - Adotada a vida útil dos materiais (ISO 15575:2013).
- Demolição:
 - Transporte com base na cidade do Rio de Janeiro;
 - Considerado 3,23 MJ/tonelada.km e 0,19 KgCO₂eq/tonelada.km para a análise do transporte dos insumos (BRIBIÁN *et al.*, 2011).
- Fim de Vida:
 - Foi considerado fim de vida em apenas um cenário, por falta de coeficiente de diversos materiais para reciclagem ou para seu descarte (aterro sanitário);



- Será considerado que uma porcentagem do resíduo será reciclado, para calcular os impactos poupados no futuro.
- Benefícios:
 - Premissa adotada de que 10% do material da etapa “Produção” vem do reuso (ADDIS, 2010).

Com base nas premissas mencionadas acima, tem-se como impacto ambiental o resultado abaixo (Gráficos 3.1 e 3.2):



Gráficos 3.1: Energia incorporada total – cenário base

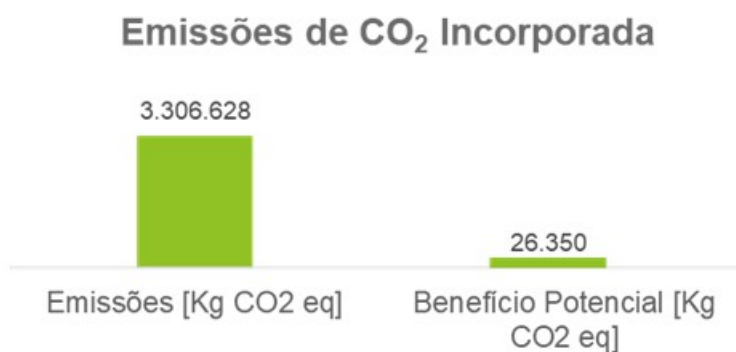


Gráfico 3.2: Emissão de CO₂ incorporada total – cenário base

Vemos que o benefício potencial, ou seja, o impacto futuro poupado para este cenário é extremamente pequeno, menor do que 1%. Isso se deve ao fato de que foi considerado que apenas 20% dos resíduos seriam reciclados. No caso dos países



Europeus, este percentual está mais próximo de 50%, taxa onde o benefício passa a ser relevante, em torno de 10%.

Para ser possível fazer comparações entre modelos e tamanhos de escolas, foi calculada a energia e emissão de CO₂ incorporadas por aluno e por m² (Gráfico 3.3 e 3.4). Utilizar a unidade de referência “aluno” é de maior interesse para pedagogos e o Governo, pois quanto mais estudantes puderem ingressar na escola, melhor. Já a unidade de referência “m²” tem mais valor para engenheiros civis, arquitetos e construtores, por ser uma das unidades de referência utilizada em negociações (QUEIROZ, 2001).



Gráfico 3.3: Impactos por aluno

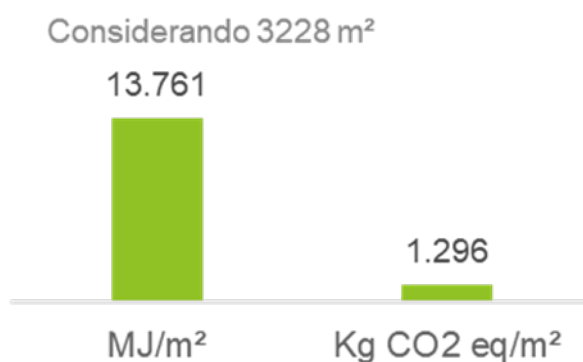


Gráfico 3.4: Impactos por m²



3.3.1 Energia Incorporada [MJ]

Observando-se a energia incorporada por cada etapa da construção, percebe-se que aquelas que mais contribuem são Produção e Manutenção (Gráfico 3.5):

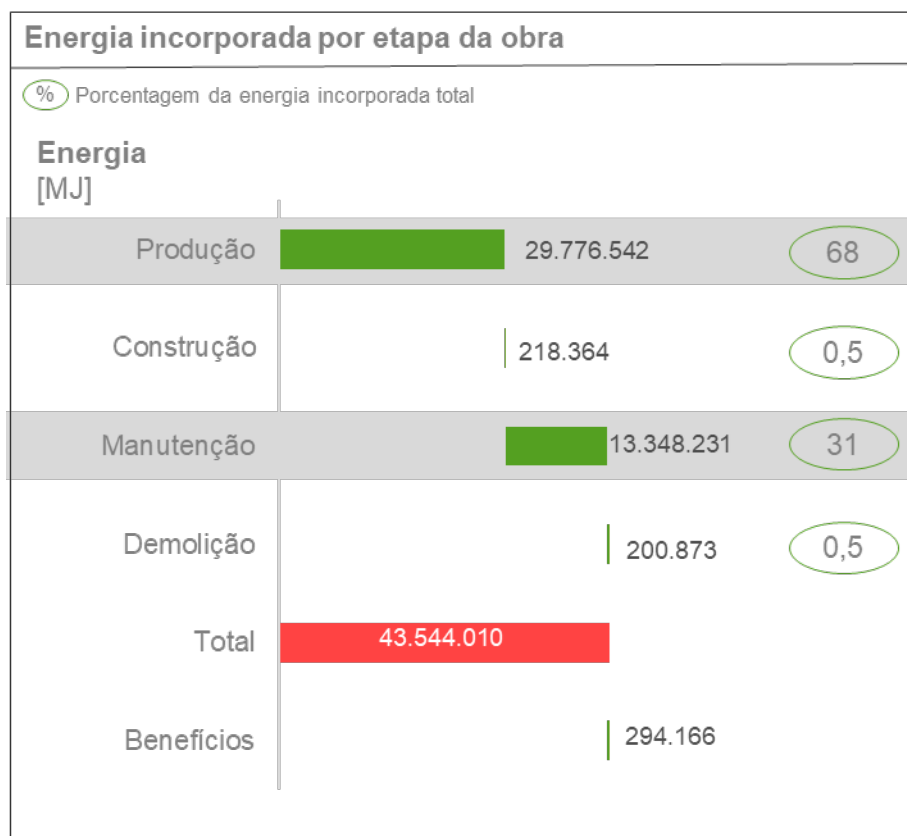


Gráfico 3.5: Energia incorporada por etapa da obra

Pelo gráfico acima (Gráfico 3.5), é possível concluir que a etapa de “Produção” é a de maior contribuição para a energia total incorporada – representa 68%. Enquanto isso, a de “Manutenção” conta com uma parcela de 31%. Somadas essas duas etapas, há uma contribuição quase total. Isso explicita a importância de priorizá-las para reduzir o impacto ambiental da escola. Os benefícios mostrados no gráfico são as emissões que poderão ser evitadas pela próxima edificação que utilizar estes materiais reciclados.

Para entender melhor o que mais afeta cada etapa, gráficos com a energia incorporada em cada serviço, por fase, foram analisados (Gráficos 3.6 e 3.7):



- *Produção*

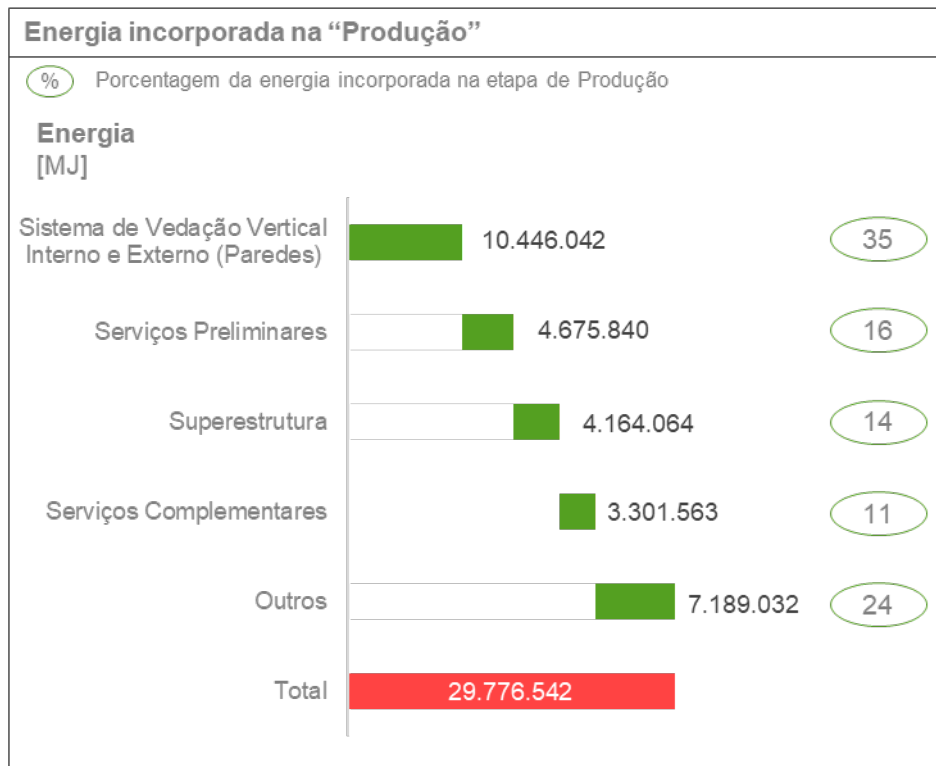


Gráfico 3.6: Energia incorporada na Produção

Conclui-se que na etapa de Produção, os sistemas de vedação (paredes), serviços preliminares, superestrutura e serviços complementares são os serviços que mais contribuem para a energia incorporada e devem ser o foco para alternativas sustentáveis.



- *Manutenção*

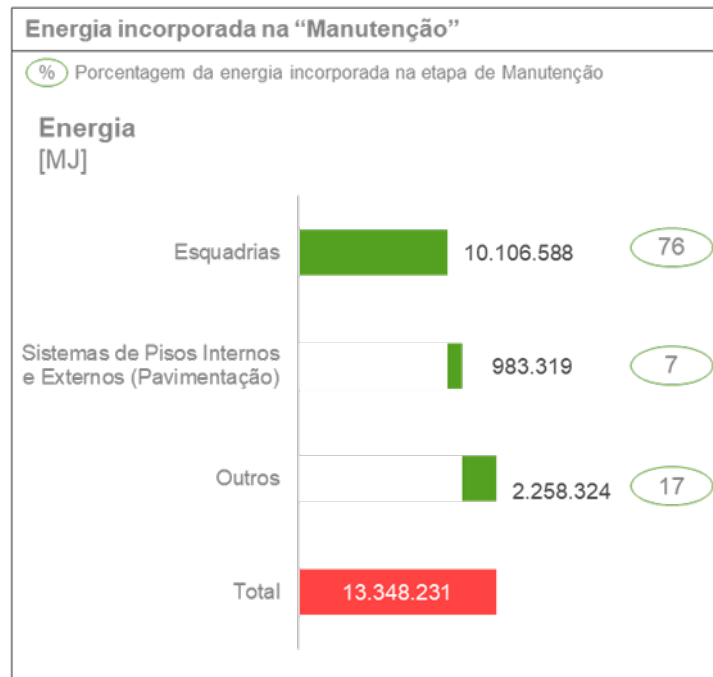


Gráfico 3.7: Energia incorporada na Manutenção

Na etapa de Manutenção, as esquadrias têm uma forte influência na energia incorporada, com cerca de 76% da energia total incorporada neste estágio. O sistema de pavimentação é o segundo serviço a incorporar mais energia, porém ainda assim apresenta valor bem abaixo das esquadrias.

3.3.2 *Emissão Incorporada [Kg CO₂ eq]*

Percebe-se que, da mesma forma que na energia incorporada, as etapas de “Produção” e “Manutenção” geram os impactos mais representativos para a emissão de CO₂ (Gráfico 3.8):

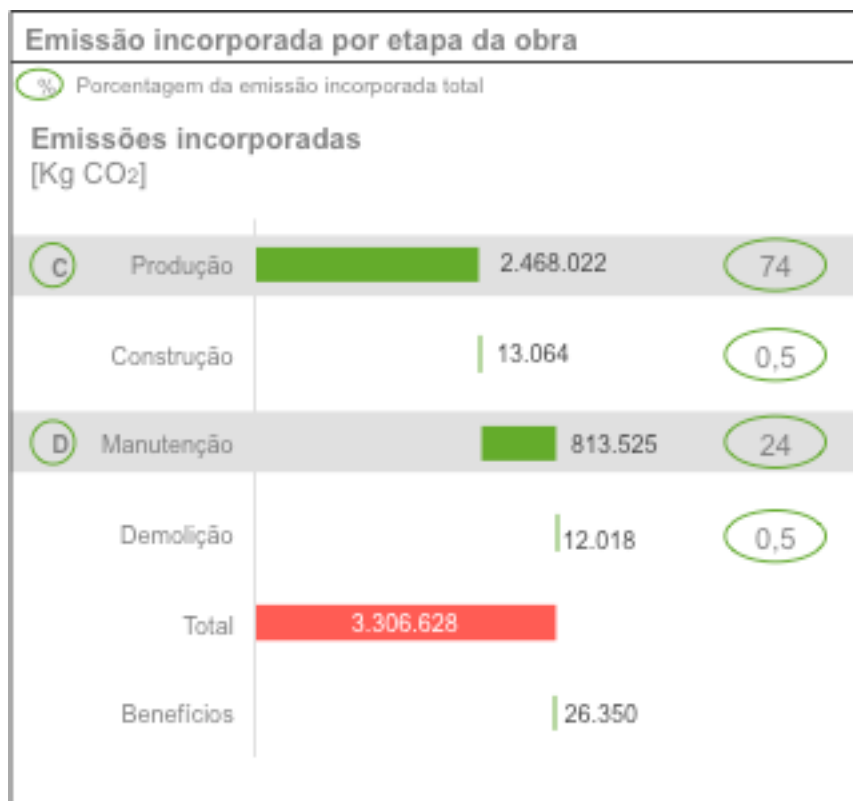


Gráfico 3.8: Emissão incorporada por etapa da obra

Pelo gráfico acima, é possível concluir que a etapa “Produção” também é a de maior contribuição para a energia total incorporada – representa 74%. Além dela, a etapa “Manutenção” também tem um alto impacto, de 24%. Os benefícios mostrados no gráfico são as emissões que poderão ser evitadas pela próxima edificação que utilizar estes materiais.

Para entender melhor o que mais afeta cada etapa, gráficos com a emissão incorporada em cada serviço, por fase, foram analisados (Gráficos 3.9 e 3.10):



- *Produção*

A Produção, primeira etapa da obra, contribui em 74% para a quantidade total de emissão de CO₂. O serviço que mais impacta nesta etapa é o sistema de vedação (paredes) (~73%) (Gráfico 3.9):

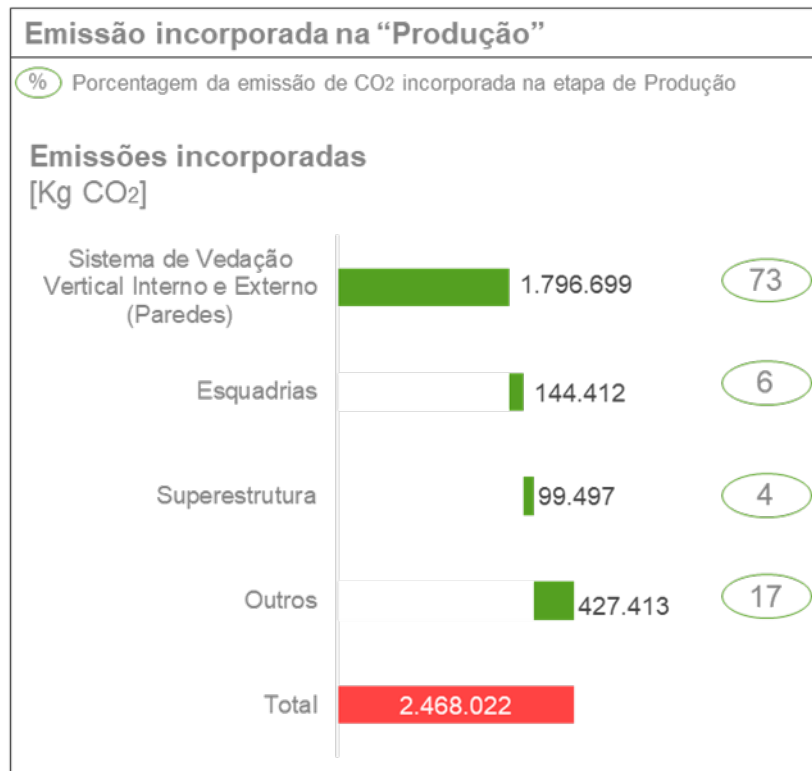


Gráfico 3.9: Emissão incorporada na Produção

- *Manutenção*

Na Manutenção, esquadrias é o serviço que mais contribui para a emissão de CO₂, assim como para energia incorporada. Sistemas de cobertura influenciam também, mas com uma porcentagem muito menor do que esquadrias (apenas 8%) (Gráfico 3.10).

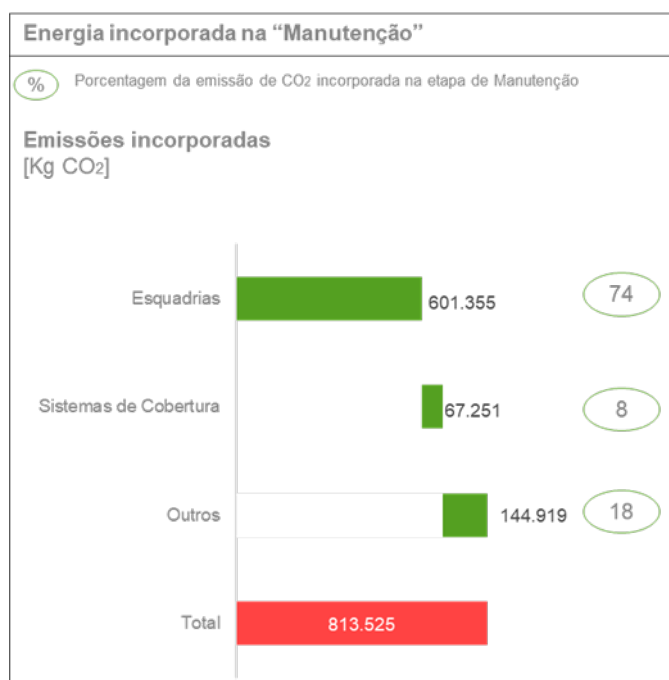


Gráfico 3.10: Emissão incorporada na Manutenção

3.3.3 Resultados com Coeficientes de Reciclagem e Descarte

Como comentado anteriormente, por falta de dados, não foi considerado nenhum coeficiente de impacto para a reciclagem e para o descarte na maioria dos cenários. Para que a análise reflita mais a realidade da construção civil, seguem abaixo algumas análises (Gráficos 3.11 a 3.13) utilizando os coeficientes que foram encontrados (NG; CHAU, 2015), (POLITECNICO DI MILANO, 2018).

É importante destacar que esses coeficientes refletem apenas os principais materiais de uma obra, como concreto e alumínio. O objetivo ao utilizá-los é de chegar a uma conclusão um pouco mais assertiva, obtendo resultados que diferenciem o impacto causado pela reciclagem e pelo descarte.



Energia Incorporada

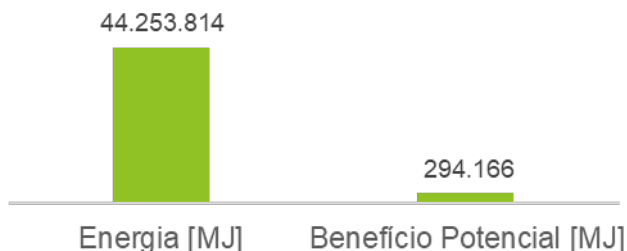


Gráfico 3.11: Energia incorporada total (com coeficientes)

Emissões de CO₂ Incorporada

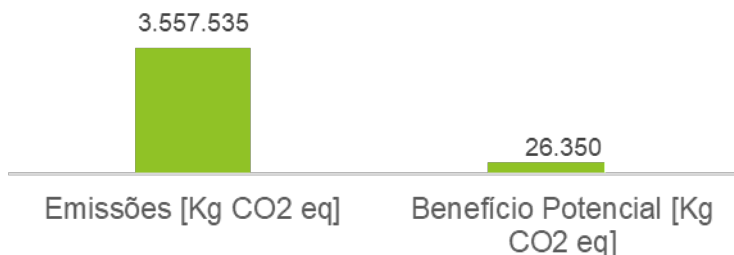


Gráfico 3.12: Emissão de CO₂ incorporada total (com coeficientes)

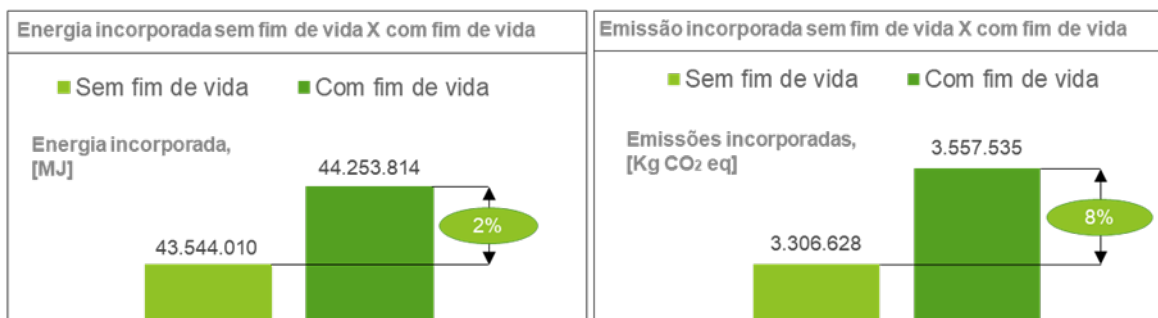


Gráfico 3.13: Impactos sem fim de vida *versus* com fim de vida (com coeficientes)

Como esperado, incluir a etapa de fim de vida aumenta o impacto ambiental de todo o processo. A grande diferença deste cenário é que ele retrata com mais transparência a realidade do ciclo de vida da escola.

3.4 Maneiras de Reduzir o Impacto Ambiental

Para reduzir o impacto ambiental das diferentes etapas de construção de uma escola, existem diversas soluções a serem exploradas.

3.4.1 Produção

Em relação aos insumos, uma iniciativa seria substituir materiais comuns por reciclados, gerando um impacto ambiental mais baixo, sem ter uma variação grande no custo da obra. Por exemplo, estudos indicam que substituir o concreto armado convencional por outros tipos de concreto pode proporcionar uma redução de 30% a 40% da energia incorporada para todo o prédio (Figura 3.1) (HUBERMAN e PEARLMUTTER, 2008).

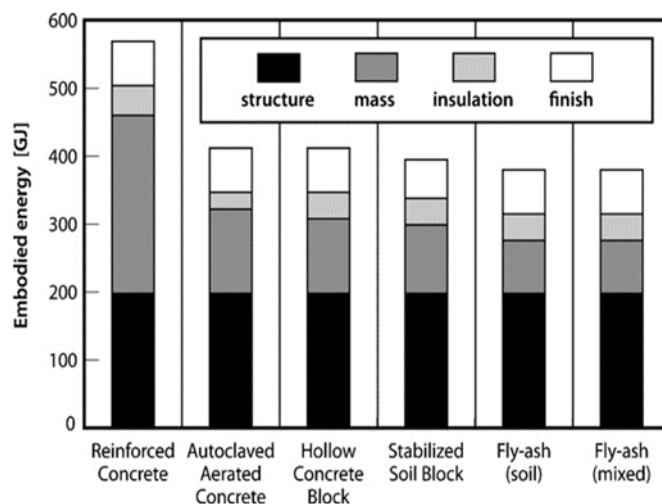


Figura 3.1: Energia incorporada obtida utilizando-se os diferentes tipos de concreto
 Fonte: HUBERMAN e PEARLMUTTER (2008)

Pode ser observado na figura acima que apesar do *reinforced concrete* (concreto armado convencional) e do *hollow concrete* (concreto “vazado”) serem baseados em



cimento, a energia incorporada do segundo é em torno de 28% a menos do que o primeiro.

Em relação ao transporte, existem diversas iniciativas que trariam um resultado mais amigável ao meio ambiente, como consolidar os fornecedores não só para garantir ganho de escala mas também reduzir o impacto do combustível, selecionar fornecedores mais próximos ou que utilizem modais distintos e com processo de produção mais eficientes. Além dessas possibilidades, outra iniciativa seria substituir a forma de transporte dos materiais até a obra.

Segundo estudos, o caminhão possui um impacto ambiental em torno de 4 vezes superior ao trilho de carga (Tabela 3.1) (BRIBIÁN *et al.*, 2011). Porém, no contexto da construção civil, esse meio de transporte se adequa pouco às situações de uma obra. Normalmente a edificação fica em uma parte mais urbana e as lojas de materiais, aterros e centros de reciclagem não ficam em regiões onde há ferrovias. Além disso, no Brasil não há ferrovias o suficiente para que esse meio de transporte seja eficaz na movimentação de materiais e resíduos.

Tabela 3.1: Coeficientes a serem utilizados em função do tipo de transporte

Categoria de Impacto	Caminhão, estrada	Trilho de Carga	Navio de Carga Transoecânico
Demanda de Energia Primária (MJ-Eq/Km)	3,266	0,751	0,170
Potencial de Aquecimento Global (GWP) (kg CO ₂ -Eq/Km)	0,193	0,039	0,011
Demanda de Água (l/km)	1,466	1,115	0,097

Fonte: Adaptado de BRIBIÁN *et al.* (2011)

3.4.2 Construção

Alterar o processo construtivo seria uma iniciativa muito relevante para o impacto ambiental gerado pela obra. Por exemplo, estudos mostram que concreto pré-



fabricado emite menos CO₂ e energia (20MJ/m² e 4 Kg CO₂/m²) do que concreto feito localmente (35MJ/m² e 5 Kg CO₂/m²) (COLE, 2000).

Reduzir perdas de materiais também geraria um resultado muito positivo. No Brasil, em torno de 20-30% de todo o material adquirido não é bem utilizado e acaba sendo desperdiçado (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Percentual de perda de material no Brasil

Fonte	Resíduos de Construção (%)
Pinto e Agopayan (1994)	20-30
Hamassaki e Neto (1994)	25
Formoso et al. (1993)	20

Fonte: Adaptado de BOSSINK e BROUWERS (1996)

Tabela 3.3: Percentual de perda de materiais específicos no Brasil

Material de Construção	Pinto (1989)	Soibelman et al. (1994)	Pinto e Agopayan (1994)
Aço	21%	16%	26%
Cimento	25%	46%	33%
Concreto	1%	12%	2%
Areia	28%	31%	28%
Argamassa	50%	48%	46%
Bloco Cerâmico	-	21%	-
Tijolo	11%	23%	12%
Madeira	-	-	32%
Cal Hidratada	-	-	51%
Azulejo Cerâmico de Parede	-	-	9%
Azulejo Cerâmico de Chão	-	-	7%

Fonte: Adaptado de BOSSINK e BROUWERS (1996)

Outros países, como a Holanda, possuem uma média de desperdício de 9% de todo o material adquirido. Essa grande diferença chama a atenção de que no Brasil há muita oportunidade de melhoria (Tabela 3.4).



Tabela 3.4: Perda de material na Holanda

Aplicação do Material de Construção	Resíduos de Construção (%)
Tábua de Pedra	9
Estacas	5
Concreto	3
Elementos de areia-cal	1
Telhas	10
Argamassa	10
Blocos de areia-cal	6
Restante (principalmente pequenos fragmentos de metal e madeira)	-

Fonte: BOSSINK e BROUWERS (1996)

Outra importante iniciativa, comentada pelo Roberto Pimentel Lopes (diretor técnico do Comitê de Portas da ABIMCI) (ABIMCI, 2018), seria reutilizar ou reciclar o material desperdiçado no processo construtivo. Em torno de 80% do material desperdiçado durante esse processo pode ser reutilizado ou reciclado. Na prática, algumas ações seriam reutilizar fôrmas e designar alguém responsável por treinar os operários e coordenar a gestão dos resíduos.

3.4.3 *Manutenção*

Na manutenção, adotar medidas que aumentem a vida útil dos materiais reduziria o impacto ambiental. Por exemplo, utilizar esquadrias com madeira que possui 20 anos de vida útil ao invés de 13 anos – para isso, investir na qualidade do material e no cuidado ao transportá-lo e manuseá-lo é de extrema importância. (ABIMCI, 2018).



Além disso, é importante que o edifício tenha uma ventilação adequada para evitar que a umidade do ar gere a necessidade de manutenção da estrutura (EQUILOC, 2016).

3.4.4 Demolição e Fim de Vida

Ações como alterar o processo de disposição dos materiais (reciclagem, aterro, incineração, etc.) e selecionar locais mais próximos para realizar a disposição podem trazer uma redução no impacto ambiental. Além disso, é importante definir um plano de demolição responsável que identifique as quantidades e tipos de materiais contaminantes e também os materiais que podem ser reutilizados ou reciclados. Proteger o solo e a vegetação durante a demolição e agendar a retirada dos materiais que podem ser reutilizados e reciclados antes da demolição são iniciativas importantes para reduzir a energia e emissões incorporadas nesta etapa.

3.4.5 Cenários

Tendo em vista os pontos mencionados acima, quatro cenários foram criados com o objetivo de analisar os possíveis efeitos das soluções já comentadas. Importante ressaltar que nesses cenários não foi considerado a etapa “Fim de Vida” (Tabela 3.5).

Tabela 3.5: Cenários analisados

Input	1	2	3	4	5
Cenário	1	2	3	4	5
Descrição cenário	Cenário base	Cenário base Reciclagem EUA	Cenário 2 Vida útil PVC e esquadrias Percentual de reuso	Cenário 3 Reciclagem UE Perda Holanda	Cenário 3 Reciclagem Perda
Reciclagem	20,00%	40,00%	40,00%	60,00%	40,00%
Descarte	80,0%	60,0%	60,0%	40,0%	60,0%
Distância descarte	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Distância reciclagem	35,30	35,30	35,30	35,30	35,30
Local de aquisição	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
Vida útil esquadrias - BR	BR	BR	Não BR	Não BR	Não BR
Vida útil esquadrias			20,00	20,00	20,00
Vida útil PVC - BR	BR	BR	Não BR	Não BR	Não BR
Vida útil PVC			30,00	30,00	30,00
Perda na construção - BR	BR	BR	BR	Não BR	Não BR
Perda na construção				10,00	15,00
Percentual do material de "Produção" que vem de reuso	10,00%	10,00%	20,00%	20,00%	20,00%
Modal de transporte utilizado	Caminhão	Caminhão	Caminhão	Caminhão	Caminhão



3.4.5.1 Cenário 2

No cenário 2, a única diferença em relação ao cenário base é o percentual de material que vai para a reciclagem, que passaria de 20% para 40%. Esse novo percentual foi baseado na taxa de reciclagem dos Estados Unidos, divulgada pela US EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) (2003).

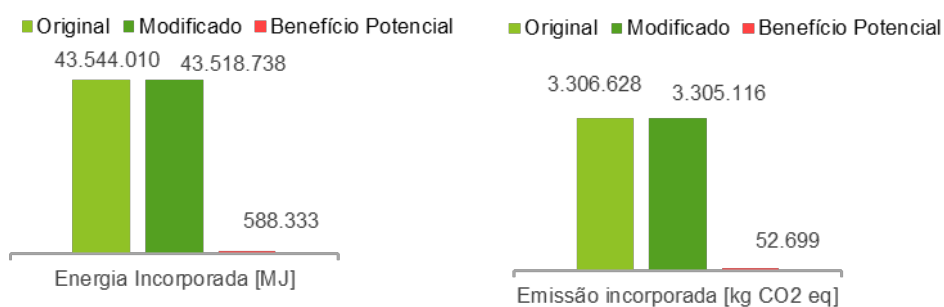


Gráfico 3.14: Impacto cenário base *versus* cenário 2

Percebe-se que praticamente não há uma redução no impacto gerado, tanto energético quanto de CO₂, mas que o benefício potencial do cenário 2 fica em torno de 2 vezes maior do que o do cenário base. Isso mostra que aumentar a reciclagem oferece um maior benefício para as futuras construções.

3.4.5.2 Cenário 3

O cenário 3 mantém a taxa de reciclagem do cenário 2 mas altera a vida útil de esquadrias e PVC de 10 e 20 anos para 20 e 30 anos, respectivamente, e aumenta o percentual de material utilizado que vem de reuso de 10% para 20%.

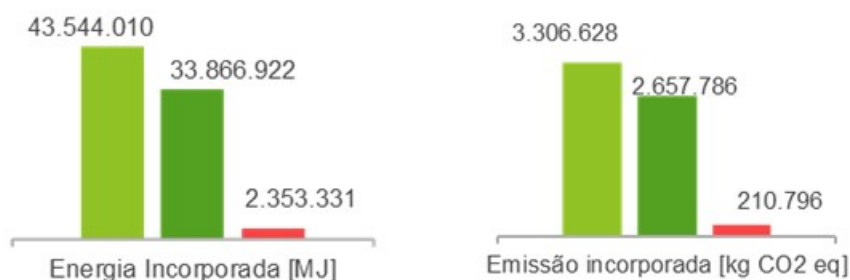


Gráfico 3.15: Impacto cenário base *versus* cenário 3

Com esse cenário, pode-se observar uma redução considerável do impacto gerado em energia (22%) e emissão de CO₂ (16%). Além disso, o benefício potencial é em torno de 8 vezes maior do que o do cenário base.

3.4.5.3 Cenário 4

A grande diferença do cenário 4 é a mudança na taxa de reciclagem e no percentual de perda. Para este cenário, foram utilizados dados da Europa. Em países como a Holanda, Dinamarca e Alemanha reciclam entre 50% e 90% do total do RCD gerado (ANGULO, 2005). Por isso, neste cenário foi considerado que 60% dos resíduos de uma construção fossem reciclados. A taxa de perda de 10% foi baseada na Holanda (BOSSINK e BROUWERS, 1996).

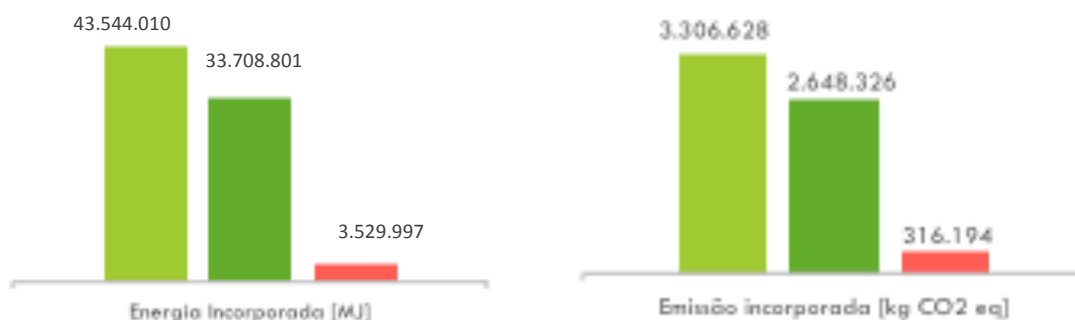


Gráfico 3.16: Impacto cenário base *versus* cenário 4



Percebe-se que, neste cenário a redução foi de aproximadamente 20%, igual ao cenário anterior. Mas, o benefício potencial aumentou para 12 vezes maior do que o do cenário base. Entretanto, por não ser uma taxa de reciclagem facilmente atingível no Brasil, esse não é o cenário ideal para o estudo de caso analisado.

3.4.5.4 Cenário 5

O último cenário se baseia no cenário 3, mas com uma perda de 10%, ou seja, menor do que os valores encontrados para o Brasil. Com ele, é possível analisar os impactos e possíveis benefícios com pequenas variações.



Gráfico 3.17: Cenário base *versus* cenário 5

Neste cenário, é possível observar que houve uma variação semelhante aos cenários anteriores (~20%), e que o benefício para construções futuras se mantém em torno de 8 vezes maior do que a do cenário base – igual ao cenário 3.

É interessante notar que aumentar a taxa de reciclagem para os 40% altera consideravelmente o resultado do benefício potencial. Isso é algo importante de ser levado em consideração para que cada vez mais as construções incorporem menos energia e emissão de gases, como o CO₂.



Em relação à energia e emissão de CO₂ incorporada, desde o 3º cenário até o 5º não houve grandes variações (redução de ~20% do cenário base). Isso sinaliza que, ao aumentar a vida útil do PVC e das esquadrias (a partir do cenário 3) pode trazer um resultado muito melhor do que o atual no Brasil – cenário base.

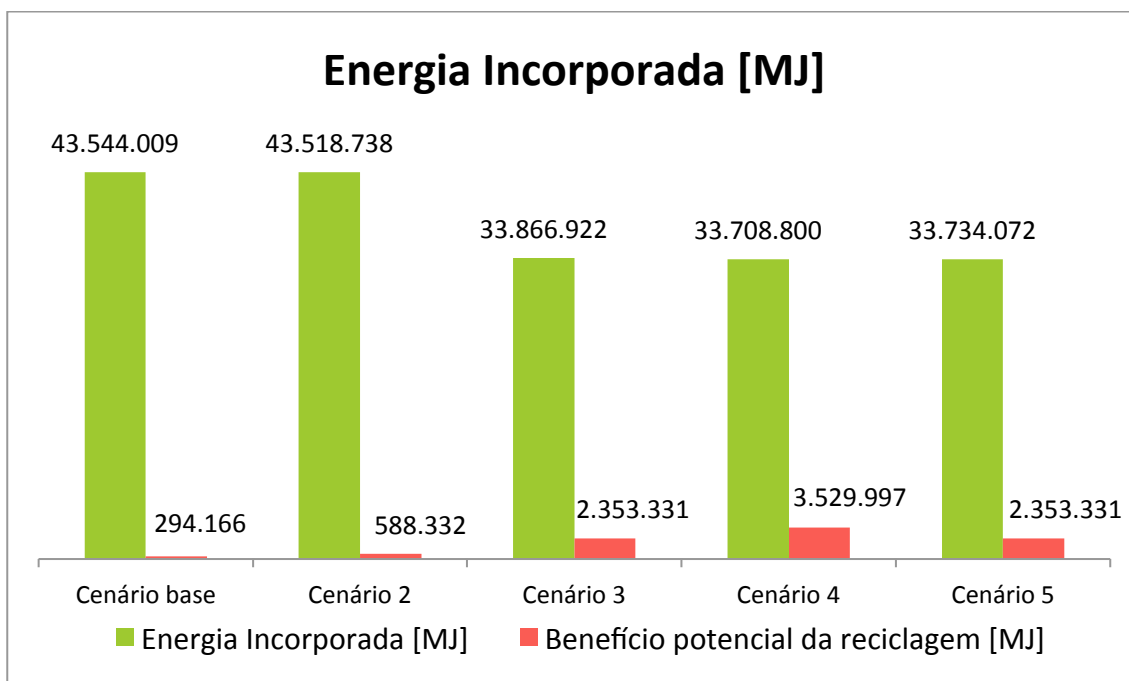


Gráfico 3.18: Energia incorporada e benefícios em cada cenário

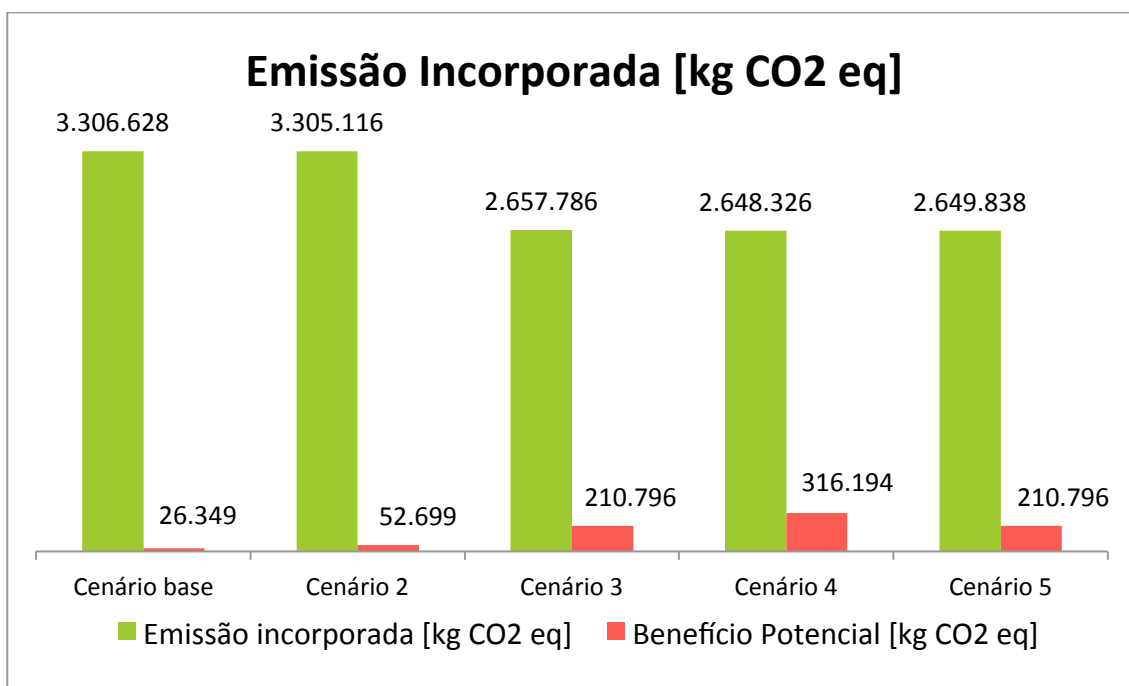


Gráfico 3.19: Emissão incorporada e benefícios em cada cenário

Analisando todos os cenários (Gráficos 3.18 e 3.19), pode-se chegar à conclusão de que com pequenas mudanças é possível fazer uma redução no impacto gerado pela escola. Ainda mais impactante é o benefício futuro que pode ser atingido ao alterar apenas a quantidade de material a ser reciclado. Hoje, no Brasil, apenas 20% dos resíduos de construção e demolição são reciclados. Se for possível atingir 40%, o resultado será muito mais benéfico para o meio ambiente.

Outro ponto a ser observado é o percentual de perda no Brasil. Cerca de 30% dos materiais são desperdiçados, enquanto que na Europa a perda chega a apenas 10%, dependendo do país. É importante que haja um cuidado no transporte e no manuseio dos materiais para buscar sempre reduzir esse percentual.



4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, pôde-se estudar e detalhar o processo completo de construção de uma escola com foco no consumo de energia e emissão de CO₂ em cada etapa. Para isso, foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

Com o estudo de caso, foi possível perceber que as etapas de Produção e Manutenção são as que mais pesam para o impacto ambiental segundo os indicadores avaliados.

Analisando os serviços de ambas as etapas, nota-se que o sistema de vedação vertical interno e externo (paredes), esquadrias e sistemas de pisos internos e externos (pavimentação) possuem um papel fundamental para o aumento ou a redução do impacto gerado pela escola. Por isso, explorar medidas relacionadas a essas etapas e serviços pode ser de grande valia para a redução do impacto ambiental no ciclo de vida de uma escola.

Diante disso, diversos cenários foram criados. Ao analisá-los, foi possível identificar algumas iniciativas que reduziriam o impacto ambiental, como: aumentar a taxa de reciclagem do RCD para 40% (*versus* os atuais 20%), adotar medidas para aumentar a vida útil de materiais como esquadrias e PVC e reduzir a perda de materiais para 10% (*versus* os atuais 20-30%).

Com essas mudanças, os impactos seriam cerca de 20% menores do que o cenário base (cenário brasileiro) e com a possibilidade de trazer um benefício para as construções futuras de 12 vezes maior do que é atualmente (menos de 1%).

O objetivo inicial deste trabalho foi avaliar o ciclo de vida de uma escola. Este objetivo foi atingido, porém há a necessidade de aprimorar os dados coletados e os cálculos feitos para chegar a resultados mais próximos da realidade. Por exemplo, é de



extrema importância obter mais coeficientes de aterro e reciclagem para mensurar o impacto desta etapa. Outra opção seria substituir os materiais utilizados por outros que incorporem menos energia, como diferentes tipos de concreto que tenham uma composição menos agressiva ao meio ambiente.

Dessa forma, conclui-se que, com a abordagem da metodologia ACV, é possível encontrar alternativas que reduzam a energia e a emissão de CO₂ incorporadas pelos materiais na construção, levando mais em consideração o desenvolvimento sustentável.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIMCI. Guia Especial de Portas da Abimci. **Edição III - Ano 3**, 2018.
- ABNT. ABNT NBR ISO 14040 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 1–22, 2009.
- ABRECON. **Pesquisa Setorial**. [s.l: s.n.].
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 2013.
- ADDIS, B. **Reuso de Materiais e Elementos de Construção**. [s.l: s.n.].
- ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 2005.
- BAUMANN, H.; TILLMAN, A.-M. **The Hitch Hiker's Guide to LCA**. [s.l.] Professional Pub Service, 2004.
- BOSSINK, B. A. G.; BROUWERS, H. J. H. Construction waste: Quantification and source evaluation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 122, n. 1, p. 55–60, 1996.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Sustainability of Construction Works, Assessment of Environmental Performance of Buildings, Calculation Method. n. 15978, 2011.
- BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**, v. 44, n. October, p. 196–205, 2015.
- COLE, R. J. Building environmental assessment methods: Assessing construction practices. **Construction Management and Economics**, v. 18, n. 8, p. 949–957, 2000.
- COLTRO, L. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. [s.l: s.n.].
- EC JRC. **General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. [s.l: s.n.].
- FILHO, D. T. DE A. Proposta de Quantificação de Resíduos para uma Obra padrão da Administração Pública. 2018.
- HUBERMAN, N.; PEARLMUTTER, D. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 5, p. 837–848, 2008.
- ISO 14040. **Environmental Management - Life cycle assessment - Principles and framework**, 2006.
- ISO 14044. **Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**, 2006.
- NG, W. Y.; CHAU, C. K. New Life of the Building Materials-Recycle, Reuse and Recovery. **Energy Procedia**, v. 75, p. 2884–2891, 2015.
- PINTO, T. DE P. Perdas de Materiais em Processos Construtivos Tradicionais. 1989.
- POLITECNICO DI MILANO. Solid Waste Management and Treatment. **DICA Environmental Section**, p. 3–6, 2018.
- QUEIROZ, M. N. DE. Programação e Controle de Obras. p. 95, 2001.
- REVISTA ESPACIOS. Aplicação e Utilização da Análise do Ciclo de Vida na indústria. **Revista Espacios**, v. 32, p. 29, 2011.



- RODRIGUEZ, G. S. Gerenciamento De Resíduos No Setor Da Construção Civil : Um Estudo De Caso. 2014.
- SOARES, S.; SOUZA, D.; PEREIRA, S. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. **Coletânea Habitare**, v. 7, n. 1985, p. 96–127, 2006.
- SOUZA, U. E. L. DE et al. Alternativas para a Redução do Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obras. 1998.
- UNEP/SETAC. Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators Volume 1. v. 266, p. 159, 2016.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION. Construction and Demolition Materials Amounts. **Building Related**, 2003.
- ZABALZA BRIBIÁN, I.; VALERO CAPILLA, A.; ARANDA USÓN, A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011.



ANEXOS

- Distâncias consideradas no estudo de caso:

	Local	Distância [KM]
Loja de material	Leroy Merlin Rio Barra	17
Aterro	CTR Seropédica	80,00
Reciclagem	CRR - Centro de Reciclagem Rio (matriz)	35,30

- Vida útil dos sistemas:

Sistema	Duração mínima (anos) (ABNT NBR 15575:2013)
Estrutura	50
Pisos internos	13
Vedação externa	40
Vedação interna	20
Cobertura	20
Hidrosanitário	20
Esquadrias internas	10
Esquadrias externas	25
Instalações	25
Ferragens esquadrias	5
Impermeabilização	20
Pintura	10
PVC	20
Vidros	30

- Coeficientes de transporte:

Modal	MJ/T.km	Kg CO2 eq/T.km
Caminhão	3,226	0,193
Trem	0,751	0,039

Fonte: BRIBIÁN *et al.* (2011)



- Percentual de perda dos materiais:

Material	Perda (%)	Fonte
Cimento	33	PINTO, 1989
Areia	39,02	PINTO, 1989
Argamassa	98	PINTO, 1989
Concreto usinado	9	FINEP 1998
Aço	10	FINEP 1998
Blocos e tijolos	17	FINEP 1998
Eletrodutos	15	FINEP 1998
Condutores	25	FINEP 1998
Tubos PVC	20	FINEP 1998
Placas ceramicas	16	FINEP 1998
Tinta	14	FINEP 1998
Gesso	45	FINEP 1998
Cal	97	FINEP 1998
Pedra	75	FINEP 1998
Concreto produzido na obra	6	FINEP 1998
Madeira	15	PINTO, 1989
Argamassa colante	10	PINTO, 1989
Azulejos	10	PINTO, 1989
Componentes vedação	13	PINTO, 1989
Aço CA-50/60	26	PINTO, 1989
Revestimento de argamassa (paredes ext.)	53	SOUZA <i>et al.</i> , 1998
Revestimento de argamassa (paredes int.)	102	SOUZA <i>et al.</i> , 1998
Revestimento de argamassa (pisos)	42	SOUZA <i>et al.</i> , 1998
Revestimento cerâmico - pisos	19	SOUZA <i>et al.</i> , 1998
Revestimento cerâmico - paredes	13	SOUZA <i>et al.</i> , 1998
Revestimento cerâmico - fachadas	13	SOUZA <i>et al.</i> , 1998
Prego	10	Estimativa
Telhas	5	Estimativa
Arame	10	Estimativa
Fio - sistema elétrico	5	Estimativa
Sistema hidráulico	5	Estimativa
Pedra britada	15	Estimativa
Conexões de cobre	3	PINTO, 1989
Vidro em chapas	9	PINTO, 1989
Janelas pré envidraçadas	16	PINTO, 1989



- Resíduo gerado pelos materiais utilizados:

Material	Resíduo gerado (%)	Fonte
Aço	0	RODRIGUEZ, 2014
Arame Recozido	0	RODRIGUEZ, 2014
Tábua	20	RODRIGUEZ, 2014
Prego	100	RODRIGUEZ, 2014
Concreto usinado	4	RODRIGUEZ, 2014
Madeirite	10	RODRIGUEZ, 2014
Bloco de concreto	30	RODRIGUEZ, 2014
Argamassa	97	RODRIGUEZ, 2014
Concreto	4	RODRIGUEZ, 2014
Caibro	100	RODRIGUEZ, 2014
Argamassa industrial	19	RODRIGUEZ, 2014
Solo	100	FILHO, 2018
Madeira compensada	20	FILHO, 2018
Forma de madeira	8	FILHO, 2018
Cobogó de concreto	13	FILHO, 2018
Alvenaria ½ vez	14	FILHO, 2018
Alvenaria 1 vez	14	FILHO, 2018
Encunhamento	11	FILHO, 2018
Granito	0	FILHO, 2018
Telha metálica	0	FILHO, 2018
Cumeeira	0	FILHO, 2018
Calha	0	FILHO, 2018
Rufo	0	FILHO, 2018
Tinta betuminosa	0	FILHO, 2018
Emboço	14	FILHO, 2018
Reboco	14	FILHO, 2018
Revestimento cerâmicos	4	FILHO, 2018
Roda meio	5	FILHO, 2018
Vidro liso	0	FILHO, 2018
Espelho cristal	0	FILHO, 2018
Contrapiso	8,4	FILHO, 2018
Piso cerâmico	3	FILHO, 2018
Piso de borracha	2,6	FILHO, 2018
Piso tátil	0	FILHO, 2018
Meio fio de concreto	10	FILHO, 2018
Massa para paredes	6	FILHO, 2018
Pintura em latex	6,4	FILHO, 2018
Tubo de PVC	1,2	FILHO, 2018
Sumidouro e fossa séptica	9	FILHO, 2018
Tela metálica	0	FILHO, 2018



Material	Resíduo gerado (%)	Fonte
Tubo de aço	0	FILHO, 2018
Tubo de aço galvanizado	1,3	FILHO, 2018
Fio de cobre	0	FILHO, 2018
Eletroduto PVC	3	FILHO, 2018
Caixa de areia	3	FILHO, 2018
Vergalhão	0	FILHO, 2018
Areia	20	Estimativa
Cal	20	Estimativa

- Coeficientes de impacto encontrados para aterro e reciclagem:

Material	Destino	Energia Incorporada (MJ/kg)	Fonte
Metais Ferrosos	Reciclagem	32,75	NG <i>et al</i> , 2015
Al	Reciclagem	108,6	NG <i>et al</i> , 2015
Concreto	Reciclagem	0,805	NG <i>et al</i> , 2015
Vidro	Reciclagem	11,9	NG <i>et al</i> , 2015
Aço	Reciclagem	11	NG <i>et al</i> , 2015
Plástico	Reciclagem	60	Alissa Johnson Penn Sustainability Review (2015)
Aço	Aterro	0,197	Environmental LCA - Olivier Jolliet <i>et al</i> .
Al	Aterro	0,521	Environmental LCA - Olivier Jolliet <i>et al</i> .

Material	Destino	CO2eq	Fonte
Metais Ferrosos	Reciclagem	0,352925	Politecnico Milano
Al	Reciclagem	0,81725	Politecnico Milano
Concreto	Reciclagem	0,0294	Won-Jun Park <i>et al</i> . (2019)
Vidro	Reciclagem	0,23	U.S. Environmental Protection Agency
Aço	Reciclagem	0,00657	Environmental LCA - Olivier Jolliet <i>et al</i> .
Plástico	Reciclagem	0,0201	Environmental LCA - Olivier Jolliet <i>et al</i> .
Aço	Aterro	0,0070625	Politecnico Milano
Al	Aterro	0,043625	Politecnico Milano