



Catarina Campelo de Mendonça

**Fluxo de informação (IDM) considerando o
cálculo da energia e carbono embutido para
reuso de aço estrutural**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Elisa Dominguez Sotelino

Rio de Janeiro

Novembro de 2019



Catarina Campelo de Mendonça

**Fluxo de informação (IDM) considerando o
cálculo da energia e carbono embutido para
reuso de aço estrutural**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Profa. Elisa Dominguez Sotelino

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Sergio Scheer

Centro de Estudos de Engenharia Civil - UFPR

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e da orientadora.

Catarina Campelo de Mendonça

Graduou-se em Engenharia Civil pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro), no Rio de Janeiro em 2017. Entrou no programa de Pós-graduação da PUC-Rio em 2017 e desenvolveu a dissertação na linha de pesquisa BIM alinhada a sustentabilidade e reaproveitamento de elementos estruturais de aço.

Ficha Catalográfica

Mendonça, Catarina Campelo de

Fluxo de informação (IDM) considerando o cálculo da energia e carbono embutido para reuso de aço estrutural / Catarina Campelo de Mendonça; orientadora: Elisa Dominguez Sotelino. – 2019.

88 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. BIM. 3. Reutilização de aço. 4. ACV. 5. Mapa de processos. 6. Projeto sustentável. I. Sotelino, Elisa Dominguez. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Aos meus pais, Carlos Alberto e Alice por todo amor, dedicação e oportunidades que me foram dadas. Pela educação impecável e por todos os momentos de apoio e orientação. Serão para sempre minhas fontes de inspiração.

Ao meu irmão, Alexandre, pela amizade inabalável.

A minhas avós, Joselina e Nilza, que mesmo não estando ao meu lado durante todo o período do mestrado me deixaram todas as lembranças, ensinamentos e carinhos que me tornaram quem sou hoje.

Ao meu namorado, Yann, por todo o apoio, carinho, incentivo e sua paciência mesmo nos momentos mais difíceis. Serei eternamente grata pelo seu companheirismo.

A todos os meus amigos, em especial a Carina e Juliana, pelos momentos de desabafos e incentivos.

Aos meus amigos do mestrado, em especial ao Alexandre, Hélder, Lucas, Vinícius e William, que compartilharam comigo momentos de ansiedade e preocupações e pela rede de apoio durante esses anos.

A minha orientadora, Elisa Sotelino, por todos os seus ensinamentos, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e por seu apoio e compreensão.

Ao grupo de pesquisa RioBIM, pelo espaço cedido, sugestões, incentivos e contribuições à minha pesquisa e pela oportunidade de conhecer e contribuir em tantas outras pesquisas.

A construtora BIAPÓ e ao escritório Proseng por permitirem a utilização dos projetos necessários para a execução dos experimentos nesta pesquisa.

Aos professores de graduação e pós-graduação da PUC-Rio.

A CAPES e a PUC-Rio. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Mendonça, Catarina Campelo; Sotelino, Elisa Dominguez. **Fluxo de informação (IDM) considerando o cálculo da energia e carbono embutido para reuso de aço estrutural**. Rio de Janeiro, 2019, 88p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A necessidade de diminuir os impactos ambientais provenientes da indústria da construção civil estimulou a criação de acordos governamentais ao redor do mundo, métricas quantitativas de impactos ambientais, novos materiais e novas técnicas e conceitos para o desenvolvimento de projetos sustentáveis. A reutilização de materiais com alto índice de energia incorporada, como os elementos estruturais de aço, é considerada uma prática válida para atingir este objetivo, sendo mais sustentável do que a reciclagem do aço em termos de emissão de dióxido de carbono, energia incorporada, processamentos e, em alguns casos, transporte. O projeto para desmontar é um conceito aliado à prática de reutilização de aço estrutural e dos demais materiais de construção, promovendo o planejamento de desmontes futuros e contribuição da cadeia de suprimentos com materiais para reutilização. Além disso, o BIM fornece um ambiente promissor para a troca de informações durante todo o ciclo de vida da construção, assim como um novo fluxo de trabalho e informações na fase de concepção de projetos que promove melhorias nas tomadas de decisão no contexto de construções sustentáveis. Este trabalho propõe uma nova dinâmica de troca de informações através de um IDM (*Information Delivery Manual*) da concepção de um projeto com baixos índices de impactos ambientais a partir da Avaliação do Ciclo de Vida e reutilização de materiais. A Avaliação do Ciclo de Vida de cenários de uma edificação foi utilizado para desenvolver as tarefas propostas pelo IDM. Os resultados obtidos pelos experimentos indicam que o desenvolvimento de um projeto sustentável não interfere significativamente com os interesses econômicos, práticos, estéticos e que a inclusão da Avaliação do Ciclo de Vida é um fator importante nas tomadas de decisões na fase de projeto para melhorar o desempenho ambiental dos materiais utilizados.

Palavras-chave

BIM; projetar para desmontar; reutilização de aço; ACV; mapa de processos; projeto sustentável.

Abstract

Mendonça, Catarina Campelo; Sotelino, Elisa Dominguez (Advisor). **Information delivery manual considering incorporated carbon and energy calculation for structural steel reuse.** Rio de Janeiro, 2019, 88p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The necessity to reduce environmental impacts caused by construction industry promoted the creation of several government agreements around the world, quantitative measures of environmental impacts, new materials and new techniques and concepts for sustainable projects. Reusing materials with a high index of embodied energy, such as structural steel elements, is considered a valid practice to achieve this objective. Steel reuse is more sustainable than recycling in terms of carbon dioxide emissions, embodied energy, processing and, in some cases, transportation. The DfD (Design for Disassembly) is a concept allied to the practice of structural steel reuse and other building materials, planning future disassembly and contributing to the supply chain with reusable materials. Moreover, BIM provides a promising environment for the exchange of information throughout the building's life cycle, as well as a new workflow in the conceptual design phase, which improves the decision making process in the context of sustainable constructions. This work proposes a new dynamic in terms of information exchange through an IDM (Information Delivery Manual) for developing a project with low levels of environmental impact using LCA (Life Cycle Assessment) and material reuse. A building's LCA study was used to develop the analysis and interpretation of environmental impact of projects conceived using the proposed IDM. The results indicate that the development of a sustainable project does not significantly interfere with the economic, practical and aesthetic interests and that including LCA is an important parameter in decision-making at the design stage to improve the environmental performance of the materials used.

Keywords

BIM; design for disassembly; DfD; steel reuse; LCA; process map; sustainable project.

Sumário

1	Introdução	14
1.1.	Motivação	14
1.2.	Objetivo	15
1.3.	Escopo	15
1.4.	Estrutura do trabalho	15
2	Revisão estruturada da literatura	17
2.1.	Método de pesquisa	17
2.1.1.	Formulação das questões	18
2.1.2.	Seleção e avaliação dos artigos	18
2.2.	Revisão da literatura	21
2.2.1.	BIM + DfD + LCA	21
2.2.2.	BIM + DfD	22
2.2.3.	BIM + LCA	26
2.2.4.	DfD + LCA	29
3	Referencial teórico	32
3.1.	Considerações nas fases iniciais do projeto	32
3.2.	Ciclo de Vida (CV)	33
3.2.1.	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	34
3.2.2.	Emissões na construção civil	36
3.3.	Projetar para desmontar	39
3.3.1.	Conceitos do projetar para desmontar	39
3.3.2.	Tipos de desmontagens	40
3.3.3.	Planejamento da desmontagem	41
3.4.	Manual de entrega de informações (IDM)	43
4	Método de pesquisa	44
4.1.	IDM	44
4.1.1.	Mapa de processos	47

4.2. Estudo de caso (Contexto)	50
4.3. Experimentação do estudo ACV	53
4.3.1. Objetivo e escopo	53
4.3.2. Modelo e cenários	55
4.3.3. Aplicativo Tally	57
4.3.4. Banco de dados ICE	60
5 Resultados	65
5.1. Cálculo de emissões com o aplicativo Tally	65
5.2. Cálculo de emissões com o banco de dados ICE	68
5.3. Comparações entre os experimentos	70
5.4. Discussões dos resultados	72
6 Conclusões	74
7 Referências bibliográficas	76
Apêndice A	84
Apêndice B	85

Lista de figuras

Figura 1: Etapas presentes na revisão estruturada da literatura.....	17
Figura 2: Composição da lista final dos artigos em português e inglês separados por temas.	20
Figura 3: Edificação em camadas e vida útil esperada de acordo com Band 1995 (Adaptado de Salama, 2017).	23
Figura 4: Fases do ciclo de vida dos materiais da construção civil.....	33
Figura 5: As quatro fases do estudo de ACV (Adaptada de ISO 14040).....	35
Figura 6: Versão ilustrativa o IDM desenvolvido com identificação dos assuntos principais.	48
Figura 7: Conjunto de prédios do estudo de caso.....	51
Figura 8: Estrutura do conjunto de prédios.	52
Figura 9: Conjunto de prédios modelados no Autodesk Revit, fachada a esquerda e corte em perspectiva a direita.	55
Figura 10: Ilustração das diferenças entre os cenários analisados.	57
Figura 11: Interface gráfica do aplicativo Tally, página de atribuição de materiais presentes no banco de dados.	59
Figura 12: Interface gráfica do aplicativo Tally na página da geração de relatórios.	60
Figura 13: Aba principal do banco de dados ICE.....	61
Figura 14: Potencial de aquecimento global do cenário 00 pelo aplicativo Tally.....	66
Figura 15: Potencial de aquecimento global dos quatro cenários pelo aplicativo Tally.....	66
Figura 16: Potencial de aquecimento global do cenário 00 pelo banco de dados ICE.....	68
Figura 17: Potencial de aquecimento global dos quatro cenários pelo banco de dados ICE.....	69
Figura 18: Carbono incorporado na fase de produção pelas duas ferramentas.....	71
Figura 19: Energia incorporada na fase de produção pelas duas ferramentas.....	71

Figura 20: Análise da variação da distância dos perfis metálicos reaproveitados de outros locais no cenário 03.	73
Figura A- 1: Mapa de Processos, IDM.	84

Lista de tabelas

Tabela 1: Palavras chaves e palavras derivadas para filtrar os assuntos das pesquisas.	19
Tabela 2: Combinação das palavras chaves e derivadas utilizando operações Booleanos.	19
Tabela 3: Especificação dos filtros utilizados na pesquisa.	20
Tabela 4: Fases e subfases do ciclo de vida.	54
Tabela 5: Exemplo da atribuição do material dos perfis metálicos novos no aplicativo Tally.	58
Tabela 6: Exemplo da atribuição dos materiais estruturais (aço e concreto) do banco de dados ICE.	63
Tabela 7: Exemplo do cálculo da ACV do cenário 00 utilizando o banco de dados do ICE.	64
Tabela 8: Impactos ambientais mensurados pelo aplicativo Tally e pelo banco de dados ICE.	70
Tabela 9: Fases do ciclo de vida considerados na ACV pelo aplicativo Tally e pelo banco de dados ICE.	70
Tabela B- 1: Relação entre os materiais atribuídos no Revit com os materiais no Tally.	85
Tabela B- 2: Relação entre os materiais atribuídos no Revit com os materiais no ICE Database.	86
Tabela B- 3: Cálculos da ACV dos cenários 00 e 01 utilizando o banco de dados do ICE.	87
Tabela B- 4: Cálculos da ACV dos cenários 02 e 03 utilizando o banco de dados do ICE.	88

Lista de abreviações

- ACV – Avaliação do Ciclo de Vida
- AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção
- AICV – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
- BIM – *Building Information Modelling*
- CV – Ciclo de Vida
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- GIS – *Geographic Information Systems*
- GPS - *Global Positioning Systems*
- ICV – Inventário do Ciclo de Vida
- IDM - *Information Delivery Manual*
- LoD - *Level of Detailing*
- RCD – Resíduos da Construção e Demolição
- RFID - *Radio Frequency Identification*
- SLR – *Structured Literature Review*

Lista de símbolos

EE_m^{total} - Energia incorporada total do material

EE_m^i - Parcela da energia incorporada do material

EC_m^{total} - Carbono incorporado total do material

EC_m^i - Parcela de carbono incorporado do material

ee_m - Coeficiente de energia incorporada

ec_m - Coeficiente do carbono incorporado

V_m^i - Parcela de volume do material

ρ_m - Densidade do material

1 Introdução

1.1. Motivação

O setor de construção civil gera grandes volumes de resíduos sólidos devido ao processo construtivo, de demolição, escavação ou reformas. O descarte destes resíduos em aterros é uma prática popular de gerenciamento de resíduos de construção e demolição (RCD) da maioria dos países em desenvolvimento, bem como em alguns países europeus. Recursos limitados do aterro, o esgotamento de recursos naturais e a degradação ecológica causados pela crescente extração de matérias-primas estão forçando estas práticas convencionais a serem revisitadas (Iacovidou & Purnell, 2016; Koutamanis et al., 2018).

Tratados e acordos foram firmados ao redor do mundo com objetivo de reduzir a emissão de gases do efeito estufa e emissão de carbono como o *Climate Change Act* (2008), *Green Construction Board* (2013) e o *IPCC* (Densley Tingley et. al, 2017; Iacovidou & Purnell, 2016). Além de leis como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10) no Brasil (De Carvalho & Scheer, 2015).

O reuso de elementos estruturais, e dos demais RCD, aproveitam elementos que seriam descartados em aterros ou reciclados diminuindo os impactos ambientais gerados pela construção.

Neste cenário a utilização do BIM para desenvolver e acompanhar projetos durante o seu ciclo de vida, aliado as metas de gerenciamento de RCD e utilizações de materiais com menores impactos ambientais cria um cenário promissor para o desenvolvimento e modernização do setor da construção civil.

1.2. Objetivo

Essa pesquisa tem como objetivo melhorar a integração da metodologia BIM com projetos sustentáveis que visam diminuir o impacto ambiental causado pelos materiais empregados na construção por meio da reutilização de aço estrutural.

1.3. Escopo

Para cumprir o objetivo proposto este estudo focou na correlação entre BIM, Projetar para Desmontar e Avaliação do Ciclo de Vida. Uma revisão estruturada da literatura foi desenvolvida abordando estes temas principais. Foi necessário realizar a busca de artigos utilizando combinações em pares dos temas principais. Desse modo, foi possível coletar um maior número de pesquisas, identificar lacunas e possibilidades de contribuições relevantes para o cenário atual. A lacuna encontrada e que será abordada neste trabalho é que na fase inicial de projeto os responsáveis não costumam considerar o reaproveitamento de materiais provenientes de um desmonte como uma forma de reduzir os potenciais de impactos ambientais do estudo ACV como o carbono e a energia embutida. Para preencher esta lacuna é proposta uma nova dinâmica de troca de informações em um ambiente BIM ilustrado em um IDM (*Information Delivery Manual*) onde são incluídos os estudos ACV da edificação na fase inicial de projeto, aprimoramento da integração entre os projetistas e consultores, aplicação dos conceitos de projetar para desmontar e de reaproveitamento de materiais. O contexto de um conjunto de prédios foi utilizado como um experimento do processo de tomada de decisão aliado aos cenários e resultados do estudo ACV.

1.4. Estrutura do trabalho

Este documento está dividido em 6 capítulos. Capítulo 1 descreve a motivação da pesquisa, os objetivos e o método da pesquisa. Capítulo 2 apresenta o processo da revisão estruturada da literatura (SRL – *Structured Literature Review*) e a análise e síntese dos artigos dos temas BIM, projetar para desmontar

e avaliação de ciclo de vida. Capítulo 3 apresenta um referencial teórico sobre os temas abordados. Capítulo 4 apresenta o manual de entrega de informações proposto, descreve o contexto do conjunto de prédios utilizados no experimento, as considerações iniciais para executar a ACV e a apresentação das ferramentas utilizadas para o estudo ACV. Capítulo 5 apresenta os resultados da ACV do estudo, comparações e discussões dos resultados. Capítulo 6 mostra as conclusões encontradas ao decorrer da pesquisa e do estudo e dá sugestões para pesquisas futuras.

2 Revisão estruturada da literatura

Este capítulo descreve o método da revisão estruturada da literatura de pesquisas científicas envolvendo os temas de BIM, ACV e projetar para desmontar com foco em soluções sustentáveis na construção civil. Além disso, são abordadas as principais pesquisas com objetivo de conhecer o atual estágio de desenvolvimento destes assuntos para sua aplicação no trabalho.

2.1. Método de pesquisa

Com o objetivo de conhecer o desenvolvimento de pesquisas científicas na área e identificar as lacunas do conhecimento na literatura foi conduzido uma revisão da literatura estruturada (SLR – *Structured Literature Review*). Com a revisão estruturada é possível identificar lacunas de conhecimento de forma imparcial e completa, promovendo um direcionamento da pesquisa nos assuntos de interesse com um caráter relevante no cenário atual.

A revisão estruturada da literatura segue as etapas mostradas na Figura 1 (Kitchenham & Charters, 2007). Vale ressaltar que em algumas situações essas etapas podem ser repetidas ou refinadas para melhorar os dados da pesquisa.

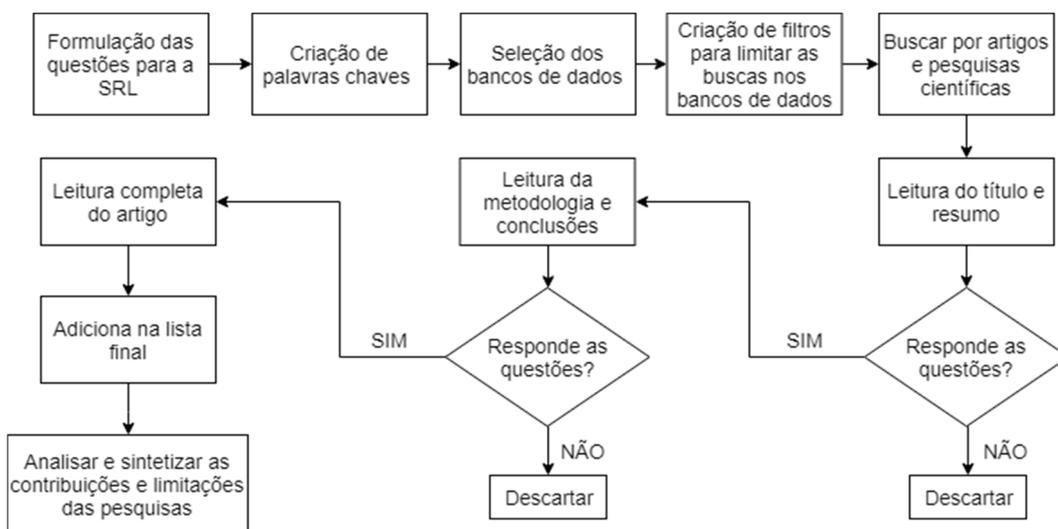


Figura 1: Etapas presentes na revisão estruturada da literatura.

2.1.1. Formulação das questões

Para guiar a revisão estruturada da literatura as duas questões abaixo foram formuladas. As questões abordam temas relacionados a BIM, reaproveitamento de materiais, projetar para desmontar e estudo ACV, assim como interações entre elas.

- Como incluir as possibilidades do reaproveitamento de aço estrutural e do projetar para desmontar durante a etapa de projeto na metodologia BIM?
- Como avaliar os impactos ambientais com um estudo ACV dos materiais de construção civil no desenvolvimento do projeto de edificações em um ambiente BIM?

2.1.2. Seleção e avaliação dos artigos

A próxima etapa da revisão estruturada da literatura é a definição de palavras chaves que ajudam a encontrar pesquisas com potencial de responder as questões formuladas. As palavras chaves são os dados de entrada para navegar pelos bancos de dados de pesquisas e artigos, por isso sua escolha é de fundamental importância. Durante a busca por artigos houve necessidade de alterar as palavras chaves até que o resultado das pesquisas nos bancos de dados fosse coerente com a revisão proposta. Finalmente, três palavras chaves foram escolhidas, sendo elas: BIM, *Design for Disassembly* (DfD) e *Life Cycle Assessment* (LCA) em inglês e BIM, projetar para desmontar e avaliação do ciclo de vida (ACV) em português.

Foram consideradas as variações de grafias, como no caso de BIM para *Building Information Modeling* e *Building Information Modelling*, assim como as traduções livres para *Design for Disassembly*, como design para desmontagem e projetar para desmontar. Também foi considerado o termo *Design for Deconstruction* que é utilizado por alguns autores como DfD aplicado a construção civil.

As palavras chaves podem ter palavras derivadas que filtram os artigos por temas. A Tabela 1 mostra esta relação para as palavras chaves em inglês.

Tabela 1: Palavras chaves e palavras derivadas para filtrar os assuntos das pesquisas.

BIM	DfD	LCA
Sustainability Green design methods Low carbon design Design guidance Project life cycle phases Decision making Information flow	Steel reuse Circular economy Building materials Resources efficiency End-of-use Construction	Sustainability Environmental impacts Climate change Reuse Building materials Embodied emission

As pesquisas com as palavras chaves em português não obtiveram muitos artigos como resultado, dessa forma a avaliação da relevância dos artigos pode ser feita sem a necessidade de maiores filtragens, descartando a utilização de palavras derivadas.

Os bancos de dados e portais de acessos utilizados nas pesquisas dos artigos foram o Scopus, Engineering Village, Science Direct e CAPES Periódicos. Em todos os bancos de dados selecionados foram utilizados os operadores booleanos “AND” e “OR” para combinar as palavras chaves e as palavras derivadas em *strings* como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Combinação das palavras chaves e derivadas utilizando operações Booleanos.

BIM + DFD	BIM AND ("sustainability" OR "Green design methods" OR "low carbon design" OR "design guidance" OR "project life cycle phases" OR "decision making" OR "information flow") AND DFD AND ("steel reuse" OR "circular economy" OR "building materials" OR "resources efficiency" OR "end of use" OR "construction")
BIM + LCA	BIM AND ("sustainability" OR "Green design methods" OR "low carbon design" OR "design guidance" OR "project life cycle phases" OR "decision making" OR "information flow") AND LCA AND ("sustainability" OR "environmental impacts" OR "reuse" OR "climate change" OR "building materials" OR "embodied emission")
DFD + LCA	DFD AND ("steel reuse" OR "circular economy" OR "building materials" OR "resources efficiency" OR "end of use" OR "construction") AND LCA AND ("sustainability" OR "environmental impacts" OR "reuse" OR "climate change" OR "building materials" OR "embodied emission")

Para ajudar a filtrar os resultados foram utilizados alguns filtros quanto ao tipo de publicação, ano da publicação, idioma e setor da indústria. Todos os filtros utilizados são mostrados na Tabela 3. Em alguns momentos durante a leitura dos artigos foi considerado necessário buscar por algumas outras pesquisas citadas que por algum motivo foram excluídas pelos filtros, mas que aparentavam ter relevância ao estudo. Como no caso de artigos publicados antes de 2014, ou alguns artigos de conferências, teses e dissertações.

Tabela 3: Especificação dos filtros utilizados na pesquisa.

Incluir	Excluir
Artigos de revistas	Outros (artigos de conferências, etc.)
Entre 2014 e 2019	Fora desse período
Inglês e Português	Todos os outros idiomas
Indústria AEC	Todos os outros

A lista dos artigos em inglês é constituída por 4 artigos que abordam BIM + LCA + DfD, 14 artigos de BIM + DfD, 12 artigos de BIM + LCA, 12 artigos de DfD + LCA e 3 artigos que foram deixados de fora da pesquisa por causa da limitação da data de publicação. A lista final em inglês é composta por 47 artigos.

A lista em português é composta por 10 artigos todos sobre o assunto BIM + ACV, sendo 5 artigos de revistas e 5 artigos de conferências. Não foram encontradas pesquisas em português relacionado a projetar para desmontar na construção civil.

A lista final dos artigos em português e inglês compreende o total de 55 artigos como mostrado na Figura 2.

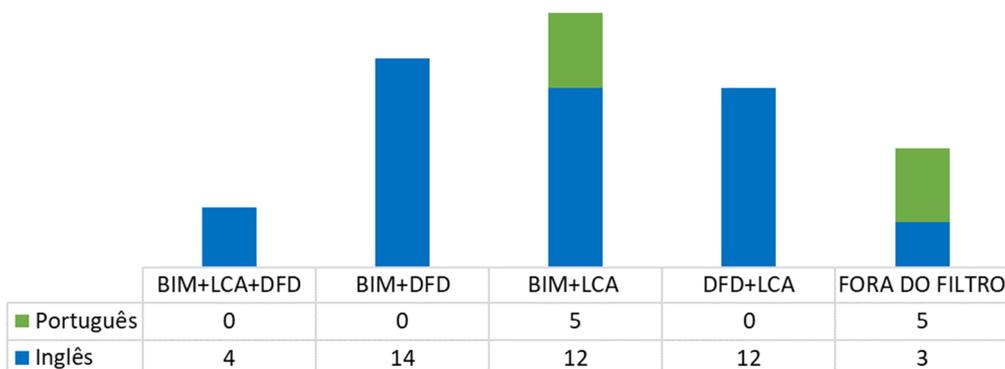


Figura 2: Composição da lista final dos artigos em português e inglês separados por temas.

2.2. Revisão da literatura

2.2.1. BIM + DfD + LCA

Poucas pesquisas abordam a integração dos temas macro significativamente, no caso da pesquisa de Akinade et al. (2018) onde foi avaliado as expectativas dos profissionais de AEC sobre como o BIM poderia ser empregado para o gerenciamento de resíduos da construção e demolição, o projetar para desmontagem foi apenas citado como um método para atingir a economia circular. As expectativas relatadas dizem respeito à possibilidade do gerenciamento e análise de resíduos a partir da colaboração de um projeto em BIM em todo o seu ciclo de vida, além da implementação de tecnologias e ferramentas inovadoras e melhoras nas práticas de documentação.

Giesekam et al. (2014) concluíram que as estratégias que se concentram unicamente em melhorar o desempenho operacional dos edifícios e as eficiências de produção de materiais serão insuficientes para atender às metas de redução de emissões do setor. De acordo com os autores, reduções na ordem de 80% de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) exigirão um declínio substancial no uso de materiais com cadeias de suprimentos intensivas em carbono. Eles incentivam a prática da reutilização direta e citam as vantagens da utilização de técnicas como o projetar para desmontar e BIM.

A série de artigos de Akanbi et al. (2018) e Akanbi et al. (2019) relatam o desenvolvimento de duas ferramentas no ambiente BIM. A ferramenta desenvolvida na pesquisa por Akanbi et al. (2018) tem o objetivo de estimar o desempenho de todo ciclo de vida para avaliar a quantidade de elementos estruturais que poderão ser recuperados no futuro desde a fase de projeto. Os resultados do estudo de caso utilizando a ferramenta mostraram que o projeto de edifícios com estrutura de aço, conexões desmontáveis e conjuntos pré-fabricados produzem materiais recuperáveis que são na maioria das vezes reutilizáveis.

A ferramenta da pesquisa de Akanbi et al. (2019) foi desenvolvida para fornecer a avaliação do desempenho do fim de vida útil de edifícios a partir do estágio de projeto e análises na fase de desconstrução e desmontagem, visando atingir a meta da economia circular para garantir que pouco ou nenhum material

novo seja introduzido na economia. Neste artigo apenas a parte do estudo ACV da ferramenta foram desenvolvidas, faltando ser abordadas as considerações sobre a visualização do desmonte da edificação e avaliação do potencial de desmontagem.

2.2.2. BIM + DfD

Os artigos que relacionam os temas BIM e projetar para desmontagem tratam do desenvolvimento de ferramentas integradas a BIM que auxiliam no gerenciamento de resíduos e sequências de desmontagens, avaliações de cenários no fim da vida útil e definições de práticas e metodologias de desenvolvimento de projetos.

Pesquisas como os artigos de Iacovidou & Purnell (2016), Densley Tingley et al. (2017), Chong et al. (2017) e Koutamanis et al. (2018) buscaram identificar as barreiras da reutilização de materiais da construção civil abrangendo fatores econômicos, organizacionais, políticos e técnicos. Entre as barreiras encontradas por esses estudos podemos citar: a falta de informações sobre o custo, falta de locais para o armazenamento de materiais e elementos que foram desmontados e esperam para ser reutilizados, ausência da demanda do cliente por materiais reaproveitados, dificuldade para rastrear e localizar os elementos, lacunas na cadeia de suprimentos, ausência de demonstrações reais sobre as vantagens obtidas por esta prática, dificuldade para aferir a qualidade, quantidade de materiais disponíveis para a reutilização e a falta de políticas públicas que poderiam incluir uma avaliação de sustentabilidade padrão.

Para superação dessas barreiras os autores sugeriram práticas como: o treinamento dos profissionais associados à construção e desconstrução sustentáveis combinados com incentivos políticos, aumento das pesquisas que possam destacar os benefícios econômicos, ambientais, técnicos e sociais da reutilização e o uso de tecnologias que têm o potencial de fornecer o rastreamento, armazenamento e arquivamento eficientes das informações sobre os componentes.

A pesquisa de Salama (2017) identificou aspectos cruciais para transformar o atual modelo linear de materiais de construção em um modelo cíclico utilizando BIM e projetando para desmontar. Foi desenvolvida uma estrutura de concreto

armado para suportar uma futura desmontagem e o reuso de materiais em adaptações. Em casos como este foi observado que para os elementos estarem aptos a serem reutilizados estes devem permanecer em boas condições após o processo de desmontagem. O projetar para desmontagem considera que os sistemas presentes dentro da edificação são como camadas com uma estimativa de tempo de vida útil (Figura 3). Os elementos que compõem o sistema estrutural, como vigas, pilares e lajes, podem ser agrupados em uma camada com uma expectativa de vida útil similar, o mesmo vale para elementos dos demais sistemas, como o sistema de instalações hidráulicas e elétricas. Esta discretização dos materiais em camadas deve ser considerada na fase de projeto com o objetivo de que durante a sua montagem e desmontagem interfira ao mínimo com as demais camadas adjacentes, evitando expô-las ao dano e permitindo que as camadas desmontadas possam ser reutilizadas e facilmente substituídas.

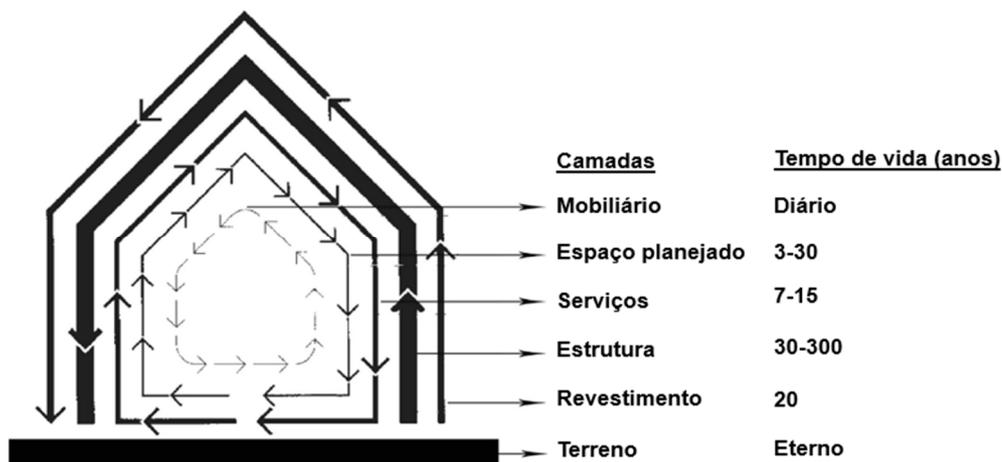


Figura 3: Edificação em camadas e vida útil esperada de acordo com Band 1995 (Adaptado de Salama, 2017).

Akinade et al. (2015) desenvolveram um índice de avaliação da desconstrutibilidade baseado em BIM chamado de BIM-DAS. Foram considerados os princípios críticos do projeto que influenciam a desmontagem do edifício e as principais características para avaliar o desempenho do projetar para desmontar. Dos três casos de construções estudados o que era constituído por estrutura de aço atingiu a maior pontuação no índice desenvolvido quando comparado com o de estrutura de madeira e de estrutura de concreto moldado in loco, devido a conexões desmontáveis e por serem elementos pré-fabricados.

Ge et al. (2017) desenvolveram um sistema de gerenciamento de resíduos de desconstrução para melhorar a eficiência da demolição, da reciclagem e redução de custos. Um prédio da Universidade de Tecnologia de Sydney foi modelado a partir de imagens tiradas por câmeras e dados coletados de plantas existentes para servir de estudo de caso. Simulações do processo de demolição foram realizadas com o modelo criado do prédio possibilitando estimativas dos materiais de desconstrução o que tornou o plano de gerenciamento de resíduos mais preciso, aumentando a taxa de reutilização e reciclagem.

Uma forma inovadora de projetar foi proposta no artigo de Ness et al. (2015), onde eles avaliaram a integração de *Radio Frequency Identification* (RFID) e BIM. A etiqueta RFID permite o armazenamento de informações e pode ser integrado ao sistema de informações geográficas (*Geographic Information Systems* - GIS) e ao sistema de posicionamento global (*Global Positioning Systems* - GPS) ou às tecnologias de ultrassom para localizar materiais e estimar sua posição no canteiro de obras. Portanto, isto poderia permitir que componentes fossem rastreados e importados para modelos virtuais na fase de projeto, assim como a adição de sensores de tensão aos elementos para o monitoramento do desempenho estrutural e das propriedades ao longo da vida útil. Em seguida Iacovidou et al. (2018) dissertaram como a utilização de etiquetas RFID em elementos de aço integrado com BIM podem criar um ambiente promissor para o desenvolvimento de novos modelos de negócios focados no gerenciamento de recursos sustentáveis. Isso é devido à possibilidade de rastrear, localizar, ler / gravar, atualizar, recuperar e armazenar informações sobre o ciclo de vida dos componentes em um banco de dados. O cenário idealizado pelos autores não corresponde ao nível tecnológico atual das etiquetas RFID e nem a sua atual popularização no setor de AEC.

Devido ao ambiente tecnológico e integrado trazido pela utilização da metodologia BIM muitas pesquisas foram baseadas no desenvolvimento de ferramentas e métodos que analisam sequências de desmontagens e geração de resíduos. Entre as funcionalidades essenciais que uma ferramenta de desmontagem integrada com BIM deve ter podemos citar a melhor colaboração entre as partes interessadas do projeto, a identificação de materiais recuperáveis, desenvolvimento e visualização do plano de desconstrução, análise de

desempenho e a simulação de alternativas de fim de vida entre outros (Akinade et al., 2017). O artigo de Akbarnezhad et al. (2014) exercita esses aspectos através de um plug-in que compara os efeitos de várias estratégias de desconstrução avaliando o custo, uso de energia e pegada de carbono da construção, utilizando um modelo em ambiente BIM.

Denis et al. (2018) desenvolveram um método manual para gerar sequências de desmontagem para quantificar o impacto do projetar para desmontar e melhorar o projeto. O método usa a análise de redes e BIM para fornecer informações sobre os fluxos de materiais recuperados e perdidos e o tempo de desmontagem. Por ser um método manual sua utilização se restringe a analisar pequenas partes da estrutura, pois a solução se torna complexa e demorada para resolver sem auxílio computacional.

No caso da pesquisa de Sanchez & Haas (2018) foi desenvolvido um método automatizado que planeja o desmonte de uma estrutura visando a recuperação de um elemento selecionado. A ferramenta apresenta um método recursivo baseado em regras que cria diversos caminhos para a recuperação do elemento selecionado, para isso considera as restrições das conexões entre elementos e como solução apresenta o melhor caminho de acordo com os critérios de tempo de desmonte, custos ambientais, custos de serviço e materiais recuperados e perdidos. Uma limitação da ferramenta é o fato dela não considerar toda a geometria da estrutura da construção, mas apenas a relação geométrica e a interdependência entre uma peça e suas partes vizinhas.

Muitos estudos abordam a fase de projeto com o objetivo de produzir uma edificação para que no futuro seja desmontado ou adaptado, mas alguns estudos também exploram a aplicação da desmontagem total ou parcial de edificações existentes. No estudo de Langston et al. (2008), eles desenvolveram um modelo que avalia o potencial de reutilização adaptável de edificações existentes. O modelo requer uma estimativa da vida física esperada do edifício e a sua idade atual, bem como uma avaliação da obsolescência física, econômica, funcional, tecnológica, social e legal. O algoritmo proposto utiliza essas informações e produz um índice de potencial de reutilização expresso em porcentagem. O modelo tem o objetivo de avaliar se o edifício pode ser adaptável e ter sua vida útil estendida ou se a demolição/desmontagem é uma opção mais viável.

Em complemento ao estudo anterior, Conejos et al. (2013) criaram uma ferramenta para avaliar o potencial de reutilização adaptável de futuros edifícios que utiliza o algoritmo proposto por Langston et al. (2008). A ferramenta tem o objetivo de auxiliar os projetistas a maximizar o potencial de reutilização adaptável de futuros edifícios utilizando o projeto para desmontar para ajudar a mitigar os efeitos de mudanças climáticas e para isso, é importante que os projetistas entendam totalmente o contexto do ambiente construído existente e considerem as necessidades de novos edifícios por meio de tecnologias e design apropriados.

Quando à questão econômica Dunant et al. (2018) realizaram uma comparação dos preços entre elementos de aço novo, aço para reutilização e sucata a partir de entrevistas e dados coletados de projetos. Foi identificado que a variação do preço de elementos de aço novo e da sucata variam juntos, concluindo que quando o preço do aço novo está alto é mais economicamente viável vender o aço velho como sucata, e em contrapartida foi identificado que quando o preço do aço novo está baixo a sucata traria mais benefício econômico sendo vendido como aço para reutilização. Os autores concluem que grande parte das mudanças necessárias para a adoção generalizada da reutilização do aço está concentrada em empreiteiras e nos responsáveis pelo armazenamento dos elementos de aço velho, que detêm o poder de tomar a decisão se os elementos serão vendidos como sucata ou como elementos para reutilização.

2.2.3. BIM + LCA

A principal vantagem para realizar o estudo ACV dentro metodologia BIM é a capacidade de aprimorar o processo de projeto e o auxílio à tomada de decisão durante o desenvolvimento do projeto visando convergir para uma solução otimizada (Barros & Silva, 2017). O estudo de Barros et al. (2015) comparou os fluxos de trabalho dentro e fora do ambiente BIM relativos a concepção de projetos contendo estudos ACV. Os autores observaram diferenças positivas na utilização do BIM quanto a forma de coleta dos dados para a realização do estudo ACV e quanto ao impacto gerado no processo de projeto pela definição do objetivo e escopo da ACV.

Como relatado por Machado & Moreira (2015) a integração entre o BIM e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se baseia na consolidação e acessibilidade dos Inventários do Ciclo de Vida (ICV) durante a modelagem. As ferramentas envolvidas neste processo devem garantir a qualidade dos resultados gerando um tráfego de informações sem fragmentações ou perdas. Devido a isto, grande parte das pesquisas que tratam dos temas BIM e ACV apresentam os tópicos de desenvolvimento de ferramentas para estudos ACV em ambiente BIM, concepção e avaliação do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e suas formas de utilização.

Devido à alta complexidade no desenvolvimento do ICV e das metodologias para o LCIA, pesquisas como a de Bueno et al. (2016), Bueno & Fabricio (2018) e Cavalliere et al. (2019) são indispensáveis para a utilização de ferramentas e a execução do estudo ACV de forma coerente. Os autores concordam quanto a necessidade de utilizar os bancos de dados ICV com o nível de detalhamento coerente com o LoD (*Level of Detailing*) do modelo em BIM para evitar erros provocados por simplificações. Também é discutido a possibilidade da utilização de bancos de dados diferentes para quando partes dos projetos estiverem com níveis de detalhamento distintos. Uma limitação deste método é a necessidade de possuir acesso a um grande número de banco de dados diferentes que sejam coerentes com a realidade em que o projeto está inserido.

Os autores concluem que a metodologia mais apropriada para um estudo de ACV seria sempre utilizar a versão mais recente, desenvolvida no contexto mais semelhante possível ao cenário estudado. No entanto, ainda não existem ferramentas metodológicas suficientes para a maioria das regiões do mundo, o que torna o uso de mais de um método uma melhor prática durante a fase de AICV (Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida), a fim de tornar as decisões baseadas em um estudo comparativo de ACV mais fundamentado e confiável.

As pesquisas de Graf et al. (2012), Jrade & Jalaei (2013), Bueno et al. (2018) e Cavalliere et al. (2018) abordam a criação de ferramentas que possibilitam a integração de programas em ambiente BIM com planilhas de banco de dados para o estudo de ACV. As ferramentas permitem utilizar informações diretamente do modelo BIM de maneira consistente, reduzindo o risco de erros, aproximações e omissões devido dados inconsistentes ou ausentes. Os autores concluíram que a falta de informações dos materiais por meio dos fabricantes é uma das limitações

ao se trabalhar com ACV, assim como a dificuldade da interpretação e compreensão dos resultados por não especialistas.

Outros artigos focaram no desenvolvimento de programas e modelos que calculam as emissões de gases que geram impactos ambientais relativos ao ciclo de vida dos materiais de construção e energias da fase operacional e de construção. O modelo apresentado por Krantz et al. (2015) avaliou a energia incorporada e as emissões associadas de GEE de projetos de infraestrutura. O programa de Marzouk et al. (2017) estima seis tipos de emissões durante as fases do ciclo de vida do projeto e o plug-in desenvolvido por Nizam et al. (2018) estima automaticamente a energia incorporada do material, a energia de transporte, a energia de construção e também avalia a energia incorporada em cada fase do ciclo de vida.

Os estudos ACV executados por Najjar et al. (2017), Yang et al. (2018), Marzouk et al. (2017) e Borges et al. (2017) concluíram que as fases que apresentam maior contribuição de emissão de GEE são as fases de fabricação de material e a fase de operação do edifício. Oliveira et al. (2015) e Evangelista et al. (2018) identificaram que o consumo de eletricidade e gás constituem com mais de 80% do impacto ambiental da fase operacional e os materiais de construção com maiores impactos ambiental na fase de construção são o concreto, aço e materiais cerâmicos. Medeiros et al. (2018) recomendam a revisão da aplicação de materiais de construção para reduzir a contribuição passiva ao meio ambiente, assim como a investigação de outras formas ou tecnologias de fabricação para reduzir essas emissões.

No estudo que avalia o impacto de diferentes envelopes na construção de Gan et al. (2018) os autores identificaram os pontos chave de emissão de carbono para encontrar as melhorias de design para mitigar as emissões prejudiciais ao meio ambiente.

Artigos que investigaram o estado da arte da integração de estudos de ACV na plataforma BIM como o de Caldas et al. (2015) e Bueno & Fabricio (2016) discutem que apesar das simplificações e aplicativos amigáveis para realizar o estudo ACV integrado com BIM os usuários ainda apresentam dificuldades na interpretação dos resultados e na utilização dos softwares. Portanto, é indicado que paralelamente ao desenvolvimento de metodologias e ferramentas são

necessários também o planejamento de estratégias de educação e treinamentos para o melhor aproveitamento do estudo ACV no desenvolvimento de projetos sustentáveis.

2.2.4. DfD + LCA

O estudo ACV é usualmente empregado em casos com comparações de cenários, e, portanto, funciona como uma ferramenta auxiliar para tomadas de decisões baseadas em avaliações de métricas ambientais potenciais. Dessa forma, o estudo ACV aliado à ideologia do projetar para desmontar pode analisar a viabilidade de diferentes cenários considerando os impactos ambientais e a desmontagem eficiente exigida no projeto. Alguns artigos exploraram essa temática, como no caso de Gómez de Cózar et al. (2019) que utilizaram o estudo ACV para avaliar 4 projetos estruturas desmontáveis de materiais diferentes do palco do Teatro Romano em Itália. Vitale et al. (2018) também compararam diferentes utilizações de materiais que constituíam as paredes e revestimentos em residências projetadas para minimizar o consumo de energia e impactos ambientais. Para as construções em áreas rurais com um alto nível de desmontagem de Conti et al. (2016) a ACV auxilia a escolha de materiais com baixo impacto ambiental, além disso o projeto busca utilizar materiais locais, com competitividade econômica e simplicidade construtiva. Para Brambilla et al. (2019) o estudo ACV serviu para avaliar e quantificar os impactos ambientais decorrentes de diferentes sistemas de lajes de concreto armado. Os resultados obtidos pelos autores tenderam a escolher elementos desmontáveis que pudessem ser reaproveitados como a opção mais ecológica, já que muitas categorias de impactos ambientais são dominadas pelo estágio de produção.

Arrigoni et al. (2018) investigaram o papel que fase de projeto pode desempenhar na sustentabilidade ambiental dos edifícios analisando o estudo de caso de um pavilhão construído para uma exposição internacional provisória. Os autores concluíram que o projetar para desmontagem se provou ser uma condição necessária, mas não suficiente, para minimizar os impactos no fim da vida útil, e que a fase de projeto não deve se limitar à seleção apropriada de materiais e

conexões, mas também deve prever um segundo uso para a estrutura ou para os materiais no final da primeira vida.

Além da comparação dos impactos embutidos nos materiais empregados na construção também é comum os estudos que envolvem a avaliação de cenários do fim da vida útil, comparando os impactos ambientais gerados pelas decisões após a demolição como o descarte, reciclagem ou reuso. A comparação dos cenários do estudo de Eberhardt et al. (2019) mostrou uma grande redução dos impactos ambientais quando a torre do estudo de caso sofria desconstrução seletiva em vez da demolição seguida de uma nova construção. Para Assefa & Ambler (2017) as economias ambientais são significativamente influenciadas pela composição do material do prédio, o número de ciclos de uso de componentes, bem como a vida útil do prédio e seus componentes. Segundo Zygomalas & Baniotopoulos (2016) os cenários de reutilização e realocação foram identificados como cenários de final de vida para os edifícios de aço com os maiores benefícios ambientais, principalmente devido ao fato de que os membros do aço são enviados para reutilização sem a necessidade de processos de fabricação adicionais. Densley Tingley & Davison (2012) ressaltaram que os materiais que foram projetados para desmontagem no final da vida útil para permitir a reutilização no futuro devem compartilhar os impactos ambientais associados ao material entre as vidas úteis dos edifícios. Além disso, o aumento do número de edifícios projetados para desmontar aumenta os materiais para reutilização na cadeia de suprimentos, diminuindo a necessidade de extrair recursos naturais e a quantidade de resíduos de demolição enviados para aterros sanitários, e finalmente, diminui a energia e o carbono incorporados no ambiente construído.

Outras pesquisas focaram no desenvolvimento de elementos e peças inovadoras que possibilitam a sua montagem, desmontagem e o reaproveitamento trazendo benefícios ambientais avaliados por estudos ACV. O novo modelo de laje de concreto pré-moldado de Eckelman et al. (2018) foi projetado para ser desmontado e tem a possibilidade de ser reutilizado em até 3 vezes. Pongiglione et al. (2017) apresentaram o desenvolvimento de uma conexão metálica desmontável capaz de resistir a efeitos sísmicos, que garanta tanto a possibilidade de reparo após o terremoto quanto a possibilidade de uma desmontagem comum.

Elementos estruturais de aço já foram indicados como as melhores opções a serem utilizados em projetos para desmontagem, por causa disso alguns estudos se aprofundaram no ciclo de vida deste material. Para Broadbent (2016) a indústria siderúrgica é uma parte importante no modelo de economia circular visto que o aço tem vantagens fundamentais como material para atingir esse objetivo, principalmente pelos benefícios trazidos pela reciclagem do aço. Mas ainda existe a necessidade de atualizar as práticas de produção e reciclagem de aço para evitar o desperdício de resíduos, reduzir as quantidades de recursos e energia utilizada e produzir de elementos mais fáceis de reutilizar ou reciclar. A investigação sobre os vazamentos de materiais e energia que ocorrem nos vários estágios do ciclo de vida do aço foi feito por Lanfang et al. (2015), neste estudo os autores encontraram um eficiência de 0,74 para a indústria siderúrgica dos EUA, ou seja, para cada 1 kg de produtos de aço para construção, 0,74 kg permanecem no circuito. Yeung et al. (2017) concluíram por seu estudo de caso que os maiores contribuintes para o impacto do ciclo de vida da reciclagem do aço foram os subprocessos de trituração, fusão e formação e o maior contribuinte para a reutilização foi o subprocesso de desconstrução. Segundo os autores a diferença entre o custo dos dois processos varia conforme o caso analisado.

3 Referencial teórico

3.1. Considerações nas fases iniciais do projeto

Os estágios iniciais do projeto referem-se à fase de planejamento do projeto (PP), onde são realizados estudos de viabilidade, e a fase de projeto (P), período de desenvolvimento dos conceitos, propostas do projeto estrutural, envelope da construção, equipamento técnico e interior (Cavalliere et al., 2019). Nessas fases é de fundamental importância introduzir conceitos e práticas sustentáveis, como a reuso de materiais, o projetar para desmontar, a utilização de materiais com alto desempenho ambiental e a utilização da metodologia BIM.

Normalmente, os elementos estruturais têm influência direta dos arquitetos quanto a seleção de matérias e sistemas construtivos, apresentando detalhe mais alto nos estágios iniciais de projeto pela necessidade de cálculo estrutural, enquanto que os materiais de elementos não-estruturais internos podem ser alterados após o início da construção do prédio. Logo, a tomada de decisão pelo sistema estrutural na fase inicial de projeto, aplicado a uma visão de ciclo de vida considerando custos econômicos e ambientais, é fundamental para a identificação da tecnologia mais eco-eficiente (Caldas et al., 2015; Cavalliere et al., 2019; Gómez de Cózar et al., 2019).

Os materiais utilizados na construção civil possuem alta demanda energética na sua fase de produção. Por este motivo são incentivados novas metodologias e técnicas de desenvolvimento de projeto com o objetivos de reduzir a energia embutida inicial, de manutenção e ao longo de todo o ciclo de vida da edificação (De Oliveira et al., 2015)

O uso conjunto de BIM e ACV nas fases iniciais de projeto auxilia nas tomadas de decisão principalmente nas escolhas de materiais, tecnologias e sistemas construtivos, convergindo para uma solução otimizada com a participação de diversos atores importantes para o processo. (Barros & Silva, 2017; Cavalliere et al., 2018).

3.2. Ciclo de Vida (CV)

O aumento da conscientização do consumo de energia e impactos ambientais exacerbados na construção civil forçou os profissionais das áreas de arquitetura, engenharia e construção (AEC) a considerarem práticas mais sustentáveis em seus projetos. Neste setor é observado a crescente demanda por certificações ambientais para as edificações no mundo todo, tais como a Leadership in Energy & Environmental Design (LEED), Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology - BREEAM, High Quality Environmental Standard - HQE e Alta Qualidade Ambiental (AQUA) no Brasil (Barros et al., 2015; Caldas et al., 2015).

Novas estratégias, como abordagens de construção verdes, utilização de materiais sustentáveis e sistemas de energia renovável, são necessárias para reduzir o consumo de energia, as emissões de GEE e os impactos ambientais dos materiais de construção (Najjar et al., 2017). Uma construção sustentável é caracterizada pela gestão responsável do ambiente construído, fundamentada em princípios ecológicos e no uso eficiente de recursos. Além de apresentar planejamento estruturado abrangendo todo o ciclo de vida, com a utilização de materiais duráveis e de alto desempenho (Machado & Moreira, 2015).

O ciclo de vida dos materiais empregados na construção civil é um conjunto de fases marcadas pelas entradas de materiais e energias e saídas de resíduos e emissões que podem ser simplificados como mostrado na Figura 4.

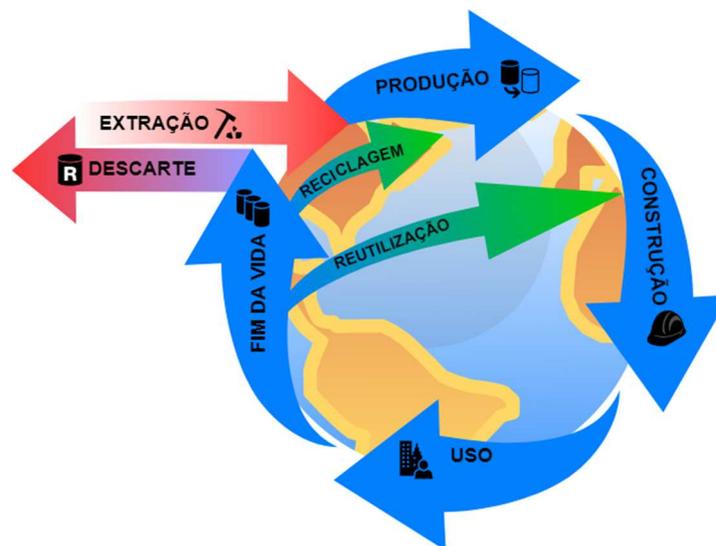


Figura 4: Fases do ciclo de vida dos materiais da construção civil.

O ciclo de vida de um produto da construção civil pode ser dividido em quatro fases, produção, construção, uso ou operação e fim da vida. A fase de produção engloba a extração de matéria prima, transporte até a fábrica, o processamento da matéria prima irá passar dentro da fábrica. A fase de construção considera o transporte do material da fábrica até o canteiro de obra e a construção em si. A fase de uso avalia o próprio uso da edificação, manutenção, reparo e reformas que ocorrem durante a vida útil, além da utilização de água e energia operacional. A fase do fim da vida caracteriza o fim da utilização da construção. Nesta fase ocorre a demolição ou desmonte do prédio e o transporte dos materiais que podem seguir caminhos diferentes. Elementos ainda em boas condições de uso podem ser reutilizados e, portanto, serem incorporados à fase de construção de um outro ciclo. Elementos que não estejam em boas condições, mas bem separados dos demais resíduos podem ser reciclados, sendo incorporados na fase de produção de um outro ciclo de vida dispensando em parte a extração de novos materiais. Elementos que não forem reutilizados nem descartados são chamados de resíduos e acabam sendo descartados em aterros.

3.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Os estudos de ACV são geralmente utilizados para auxiliar comparações entre diferentes elementos com funções semelhantes ou entre diferentes sistemas com serviços semelhantes (Bueno & Fabricio, 2016). Esta etapa é uma oportunidade promissora para cobrir os três pilares do desenvolvimento sustentável (meio ambiente, social e econômico) em um estágio inicial de projeto, além de maximizar a possibilidade de alcançar padrões de construção mais sustentáveis (Najjar et al., 2017).

A avaliação do ciclo de vida é normatizada pelas normas ISO 14040 e ISO 14044. A ACV pode ajudar a identificar melhorias no desempenho ambiental de produtos em várias fases do ciclo de vida, auxilia os tomadores de decisão na indústria, governo ou demais organizações, seleciona indicadores relevantes de desempenho ambiental, técnicas de medição e tem papel no marketing sustentável de produtos.

Para a execução da ACV no auxílio à tomada de decisão empregam-se de ferramentas e banco de dados com informações ambientais do ciclo de vida de materiais e componentes. As ferramentas podem ser divididas em dois níveis. As de primeiro nível permitem comparar diferentes materiais e sistemas construtivos com base nos seus impactos ambientais na fase de pré-uso, tais como o *BEES*, *OpenLCA*, *GaBi*, *SimaPro* e *Athena Impact Estimator*. As de segundo nível permitem a simulação do desempenho energético na fase de operação, como o *Autodesk Ecotect*, *DesignBuilder*, *EnergyPlus* e *IES Virtual Environment*. Existem bancos de dados específicos para países europeus e norte-americanos, enquanto que o Brasil ainda não possui um inventário nacional para materiais de construção (Borges et al., 2017; Najjar et al., 2017).

O estudo da ACV é dividido nas quatro fases da Figura 5 segundo a ISO 14040, incluindo a fase de definição de objetivo e escopo, fase de análise de inventário, fase de avaliação de impacto e a fase de interpretação.



Figura 5: As quatro fases do estudo de ACV (Adaptada de ISO 14040).

O objetivo e escopo do estudo de ACV devem ser claramente definidos e consistentes com a aplicação pretendida. Devido à natureza iterativa da ACV o escopo pode precisar ser redefinido ou refinado durante o estudo.

Os impactos ambientais são obtidos através da avaliação do ciclo de vida (ACV), como o consumo de energia primária, potencial de aquecimento global, eutrofização, acidificação, entre outros. O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) consiste na identificação e quantificação de todas as entradas, como o consumo de energia e recursos naturais, e todas as saídas, como as emissões gases no ar e poluições em solos e águas, que ocorrem durante o ciclo de vida do produto. A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é um processo quantitativo e qualitativo para a avaliação dos riscos e impactos ambientais em potencial associados ao ICV (Machado & Moreira, 2015; ISO 14040). Geralmente as ferramentas e programas que auxiliam no estudo de ACV trabalham na consolidação das fases ICV e AICV.

A interpretação do ciclo de vida é a fase onde as constatações da análise do ICV ou da AICV, ou de ambas, são avaliadas com relação ao objetivo e escopo definidos, a fim de se chegar a conclusões e recomendações. A fase de interpretação pode envolver um processo iterativo de analisar criticamente e revisar o escopo da ACV, assim como a natureza e qualidade dos dados coletados, de forma consistente com o objetivo definido (ISO 14040 e ISO 14044).

A ACV tem como resultado impactos ambientais potenciais e não a previsão de impactos ambientais absolutos. Isto é devido às incertezas nos métodos de modelagem de impactos ambientais e ao fato de que alguns impactos ambientais possíveis são impactos futuros. Além disso, a ocorrência dos impactos ambientais nas dimensões de espaço e tempo são difíceis de prever com exatidão (ISO 14040).

3.2.2. Emissões na construção civil

Dentre os diversos impactos ambientais existentes na produção de materiais de construção, o potencial de aquecimento global (ou equivalência em dióxido de carbono) é considerado o mais importante e um dos mais estudados. Isto é devido ao indicador fornecer uma quantificação de CO₂ em conjunto com a

existência de pressão internacional pela redução desse gás. A divisão das fases de emissões de carbono pode ser caracterizadas como carbono incorporado, emissões relacionadas às matérias primas, produção de materiais, transporte e construção; carbono operacional, emissões provenientes durante o uso; e o carbono referente ao processo de demolição, disposição de resíduos e processos de reciclagem (Borges et al., 2017).

O potencial de aquecimento global quantifica os gases de efeito estufa (GEE) em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono (CO_2). Os principais GEE são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e gases fluorados. Estes gases são produzidos a partir de atividades humanas e ficam aprisionados na atmosfera por centenas de anos sendo considerados os principais contribuintes para as alterações climáticas em âmbito global. O potencial de aquecimento global é estimado em termos de $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ (Marzouk et al., 2017; EPA, 2019a).

Outra métrica de impactos ambientais muito utilizado em pesquisas é a quantificação da energia embutida (ou energia incorporada) proveniente extração, processamento, fabricação e utilização de equipamentos e veículos de transporte. A energia embutida quantifica o uso de recursos energéticos e não os impactos ambientais associados ao uso de recursos. Os materiais da construção civil com maiores concentrações de energia embutida são o concreto, aço, vidro e tijolos (EC, 2019). A ACV energética de edificações pode ser dividida em três fases: fase pré-uso (energia incorporada), fase de uso (energia operacional) e a fase pós-uso (demolição ou reciclagem e reutilização) (Barros et al., 2015). A energia embutida é estimada em termos MJ.

O processo de acidificação consiste na transformação de poluentes atmosféricos em ácidos, o que causa a acidificação do solo e de águas. Os principais constituintes da acidificação são o dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x) e seus ácidos correspondentes (H_2SO_4 , HNO_3). Em relação aos materiais de construção, a acidificação tem potencial para danificar especialmente metais, e pode causar corrosão e ferrugem. O potencial de acidificação é estimado em termos de $\text{kg SO}_2\text{-eq}$ (Marzouk et al., 2017 ; EPA, 2016).

A eutrofização ocorre quando existe uma alta porcentagem de nutrientes na água e no ar, como nitratos (N) e fosfatos (P). A eutrofização faz com que algas cresçam mais rápido do que o ecossistema pode suportar. A proliferação de algas prejudica a qualidade da água, os recursos alimentares e os habitats, diminuindo o oxigênio que os peixes e outras espécies aquáticas precisam para sobreviver devido a morte e decomposição das algas. O potencial de eutrofização é estimado em termos de kg N-eq (EPA, 2019b).

A camada de ozônio estratosférico forma uma barreira que protege os seres humanos da Terra dos raios ultravioletas. O esgotamento da camada de ozônio, causado pelo clorofluorcarbono (CFC), pode levar a um aumento da incidência de câncer de pele, catarata e destruição do sistema imunológico dos seres humanos. O potencial de destruição de ozônio é estimado em termos de kg de CFC-eq (EPA, 2019c).

O ozônio atmosférico protege os seres vivos da radiação ultravioleta enquanto que o ozônio presente em camadas próximas ao nível do solo, chamado de Smog, pode desencadear uma variedade de problemas de saúde, particularmente para crianças, idosos e pessoas de todas as idades que têm doenças pulmonares como a asma. Smog é derivado das palavras fumaça e neblina e é um tipo de poluente do ar que é produzido a partir da utilização de veículos e motores de combustão interna, devido à reação química entre óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis. O potencial de formação de smog é estimado em termos de kg O₃-eq (EPA, 2019d).

3.3. Projetar para desmontar

Projetar um produto para desmontar significa considerar que componentes, elementos e materiais valiosos podem ser desmontados para serem reutilizados ou reconfigurados, para isto esses elementos devem permanecer em boas condições após a ocorrência do processo de desmontagem. Na indústria automotiva e de tecnologia, grande parte das peças podem ser desmontadas para manutenção ou substituição, estimulando que mais fabricantes padronizem peças para que elas sejam compatíveis com outros tipos de veículos ou máquinas. A maneira convencional de projetar e construir não segue esta filosofia, tendo em vista que o edifício é projetado para fornecer a estética e a função desejada, com uma construção rápida e sem planejamento da fase final da vida. Projetar para desmontar é um conceito relativamente novo na indústria da construção civil, as tentativas mais promissoras de sua implementação foram em projetos com estruturas de aço (Salama, 2017).

Utilizar o projeto para desmontar em um edifício o torna uma construção transformável por ter um alto potencial de desmontagem e estima-se que serão mais econômicos, sustentáveis e flexíveis conforme a popularização da prática. Isto é devido principalmente a possibilidade de reutilização dos materiais desmontados e a adaptação de um edifício para cumprir uma nova função sem ser necessário a demolição total seguido de uma construção totalmente nova (Akbarnezhad et al., 2014; Langston et al., 2008; Salama, 2017).

3.3.1. Conceitos do projetar para desmontar

Com base na revisão da literatura, as regras de design que melhoram a desmontagem dos edifícios que maximizam a flexibilidade dos projetos são:

- Especificar materiais duráveis: evita que sejam danificados facilmente, sendo resistentes ao processo de desmontagem;
- Usar materiais sem acabamentos secundários: evita que sejam danificados no processo de remoção do acabamento para o reuso;

- Utilizar juntas com parafusos: evitar o uso de colas e soldas que são consideradas ligações irreversíveis, sendo necessário o corte das peças;
- Evitar materiais tóxicos: para não comprometer a segurança da equipe de desmonte;
- Utilizar conjuntos pré-fabricados: garante a qualidade do elemento e suas dimensões.

Além disso, é recomendado que os tipos e quantidades de materiais de construção, componentes e conectores sejam minimizados para simplificar o processo de desmontagem e classificação. O uso de materiais reciclados e reutilizados é incentivado durante a especificação no projeto para ampliar a cadeia de oferta e demanda. Muitos autores defendem a técnica da criação de níveis ou camadas de materiais, agrupando peças e componentes com vida útil similares ou por função, como estrutura, revestimento, fechamento e instalação. Esta técnica visa facilitar a remoção de camadas sem expor outras camadas ao dano, onde as camadas desmontadas possam ser reutilizadas, mantidas ou substituídas. De modo que a criação de camadas torna o projeto para desmontar possível, já que as interfaces das camadas se tornam pontos de desmontagem (Akinade et al., 2015; Salama, 2017).

3.3.2. Tipos de desmontagens

Duas atividades são possíveis no final da vida útil dos edifícios, sendo elas a demolição e a desmontagem ou desconstrução. A demolição é uma estratégia de remoção de prédios considerada mais rápida e que principalmente é quase que totalmente destinada a descarte em aterros com pouca consideração pela recuperação de materiais. Por outro lado, a desmontagem tem o objetivo de facilitar a reutilização de componentes, a reciclagem de materiais e a redução da geração de resíduos da demolição, além de ser necessária no caso de presença de materiais tóxicos na construção que precisam de um descarte seguro. (Akinade et al., 2015). A desmontagem de edifícios sem materiais tóxicos pode cumprir quatro finalidades:

- Realocação de edifícios: consiste em desmontar a construção complementar e remonta-la em outro local, minimizando a necessidade de adicionar materiais novos na reconstrução;
- Reutilização de componentes: constitui em reaproveitar os elementos desmontados sem danos em uma nova construção no mesmo local do desmonte ou transportados para serem reutilizados em outros locais;
- Reprocessamento de materiais: reaproveitamento de materiais que passaram por algum tipo de adaptação antes de serem reutilizados em outros locais;
- Reciclagem de materiais: utilização dos elementos como matéria-prima no processamento de um novo material.

A desmontagem e reutilização de componentes têm muitas vantagens sobre a demolição e a reciclagem convencional. Essencialmente devido ao fato de que a reutilização preserva a energia incorporada investida dos componentes de construção e prolonga a sua vida útil, contribuindo para o modelo de economia circular. Além de reduzir significativamente o custo, o uso de energia, o distúrbio do local, a geração de resíduos de demolição e as emissões de carbono resultantes da demolição, do processo de reciclagem e do transporte para os aterros e as instalações de reciclagem (Akbarnezhad et al., 2014; Akinade et al., 2017; Densley Tingley et al., 2017).

3.3.3. Planejamento da desmontagem

Para planejar uma desmontagem são necessários esforços conjuntos dos arquitetos e engenheiros desde o estágio de projeto, assim como a definição do eventual objetivo da desmontagem, garantindo assim o sucesso do projeto para desmontar. Entretanto, utilizar as técnicas tradicionais de documentação para este propósito resultariam em centenas de documentos adicionais em papel para serem armazenadas por um período considerável. Neste caso a utilização de ferramentas computacionais de modelagem da informação da construção e esquemas de transferências de dados em plataformas neutras como o IFC podem facilitar o armazenamento e o fácil acesso a informações. A utilização de BIM no

desenvolvimento de um projeto que planeja a desmontagem futura facilita o acesso transparente a informações compartilhadas, coordena e monitora os processos de construção, permitindo que atores de várias disciplinas colaborem de forma eficaz na concepção do projeto que impacta todo o ciclo de vida (Akbarnezhad et al., 2014; Akinade et al., 2015).

A decisão de reaproveitar elementos pode ser tomada no início do desenvolvimento do projeto se forem reutilizados elementos que estão no local devido a uma desmontagem, ou durante a licitação no caso do elemento a ser reutilizado estiver em outro local. Existem três maneiras de buscar elementos reaproveitados, a primeira sendo diretamente com um empreiteiro de demolição, seguido de um estoquista de aço tradicional ou, com o surgimento de um novo ramo do mercado, comprando de um estoquista de aço reutilizado especializado (Densley Tingley et al., 2017).

As propriedades incertas do aço reutilizado já foram citadas como uma barreira à reutilização, sendo necessário muitas vezes testes destrutivos para avaliá-los. Entretanto muitos estudos já apontam formas de avaliação por testes não destrutivos. Além disso, o custo dos elementos reutilizados varia consideravelmente com o mercado de venda de aço, mas acredita-se que o preço tende a reduzir ou ao menos estabilizar devido à economia de escala. O aumento da demanda por aço reutilizado proveniente de projetos desmontados também tende a estimular mudanças no setor de demolição, assim como a orientação e educação para o setor de construção para melhorar a confiança e as habilidades em projetar com elementos reutilizados (Densley Tingley et al., 2017; Dunant et al., 2018; Ness et al., 2015).

3.4. Manual de entrega de informações (IDM)

O BIM fornece métodos para descrever, armazenar e exibir informações necessárias ao projeto, à construção e à operação de empreendimentos e ainda elimina a necessidade dos muitos tipos de documentos em papel que são atualmente utilizados. Para aproveitar ao máximo os benefícios do uso do BIM, a qualidade da comunicação entre diferentes participantes no processo de construção deve ser aprimorada. Tendo em vista que, se as informações necessárias estiverem disponíveis quando forem necessárias e a qualidade das informações for satisfatória, o processo de construção será em si melhorado. Para que isso aconteça, deve haver um entendimento comum dos processos de construção e das informações necessárias e resultantes de sua execução. Dentro da metodologia BIM a ferramenta que ajuda na integração e na troca de informações entre os participantes é chamada de manual de entrega de informações (IDM – *Information Delivery Manual*) normatizado pela ISO 29481-1:2016.

As principais funções do mapa do processo para o IDM são a definição de limites das informações contidas no processo, o estabelecimento de atividades dentro do processo e sua sequência lógica e a identificação dos requisitos de intercâmbio que suportam as atividades dentro do processo.

Um mapa de processo descreve o fluxo de atividades dentro do limite de um tópico específico, seu objetivo é obter uma compreensão da configuração das atividades que o fazem funcionar, dos atores envolvidos, das informações necessárias, consumidas e produzidas. O conjunto completo que suporta um processo de negócios é uma definição de vista de modelo (MVD - *Model View Definition*) (BuildingSMART, 2010).

A abordagem preferencial para desenvolver um mapa de processos dentro do IDM é o *Business Process Modeling Notation* (BPMN), devido principalmente a sua frequente utilização na especificação de processos de negócios dentro de grandes projetos, a existência de várias ferramentas disponíveis que trabalham com esta notação e a facilidade de leitura e interpretação do mapa de processos (BuildingSMART, 2010; ISO 29481-1:2016).

4

Método de pesquisa

Este capítulo apresenta o manual de entrega de informações proposto, descreve o contexto do conjunto de prédios utilizados no experimento, as considerações iniciais para executar a ACV e a apresentação das ferramentas utilizadas para o estudo ACV.

4.1. IDM

O IDM desenvolvido neste capítulo visa mapear a troca de informações necessárias entre os atores na fase de desenvolvimento de projeto para promover um projeto cujo seu ciclo de vida tenha baixo impacto ambiental. A fase de projeto mapeada começa pela solicitação inicial do cliente, até o desenvolvimento do projeto conceitual de arquitetura e projeto básico de estrutura, incluindo tarefas de ACV, considerações de utilização de materiais reaproveitados e a utilização do projeto para desmontar.

A primeira hipótese para o desenvolvimento do IDM foi a definição dos requisitos do cliente incluir o interesse do desenvolvimento de um projeto em que o seu ciclo de vida tenha baixo impacto ambiental, por motivos filantrópicos, de status pessoal ou da empresa, busca por certificados ambientais ou para cumprir acordos de redução de emissão de GEE e mitigação de aquecimento global impulsionados por políticas governamentais (Densley Tingley et al., 2017).

O IDM propõe um fluxo de informações a ser utilizado por empresas privadas e públicas de médio a grande porte com o objetivo de desenvolver empreendimentos sustentáveis em um ambiente BIM pelo uso de materiais reaproveitados, baixo impacto ambiental durante o seu ciclo de vida e em busca de certificados ambientais. O projeto desenvolvido com base neste IDM pode ser de empreendimentos de médio e grande porte, como galpões de logística, condomínios residenciais multifamiliares, prédios comerciais de escritórios, shoppings e prédios universitários, entre outros. Projetos de empreendimentos

temporários ou com curto período de utilização também podem se beneficiar deste fluxo de trabalho e informações, como no caso da estrutura desmontável para o palco do Teatro Romano em Itália e o pavilhão provisório construído para uma exposição (Arrigoni et al., 2018; Gómez de Cózar et al., 2019).

As definições dos atores, suas tarefas e as informações trocadas foram baseadas nas informações extraídas da revisão da literatura, conhecimentos e experiências pessoais, entrevistas com profissionais e debates com grupo de pesquisa durante o desenvolvimento do mapa de processos. Os atores e suas principais atribuições no IDM são apresentados a seguir:

- **Cliente:** O cliente corresponde as instituições privadas, públicas ou um indivíduo que solicite a outras empresas e projetistas o desenvolvimento de projetos para o empreendimento desejado. As atribuições do cliente incluem a definição do escopo do projeto, com suas funções e os requisitos para o desenvolvimento dos projetos, aprovação de projetos, orçamentos e estudo apresentados, solicitação de revisão de projetos, escolha entre os cenários e soluções propostos pelo corpo técnico.
- **Arquiteto:** O ator do arquiteto corresponde ao grupo de pessoas de um escritório de arquitetura ou setor de arquitetura de uma empresa contratada para desenvolver o projeto conceitual arquitetônico. A equipe de arquitetura é responsável pela concepção do projeto arquitetônico que atenda aos requisitos do cliente, definição do material estrutural a ser usado e o lançamento estrutural inicial. Além disso, a equipe de arquitetura deve avaliar a realização de atualizações no projeto devido a incompatibilidades com os projetos de outras disciplinas.
- **Engenheiro Estrutural:** Este ator corresponde ao grupo de pessoas de um escritório de projeto estrutural ou setor de desenvolvimento de projetos estruturais de uma empresa contratada para desenvolver o projeto estrutural sustentável, com baixo impacto ambiental e integrado na economia circular de materiais de construção. A equipe de projetistas estruturais é responsável pela concepção do projeto estrutural conceitual e básico que atenda aos requisitos do cliente e que sustente a forma definida pela equipe de arquitetura, por avaliar a

inclusão de elementos estruturais reaproveitados e utilizar os conceitos de projetar para desmontar seguindo as recomendações e relatórios dos consultores, e por executar o projeto de demolição/desmante caso exista alguma construção no terreno. Além disso, esta equipe também deve avaliar a realização de atualizações no projeto devido a incompatibilidades com os projetos de outras disciplinas.

- Gerente de Projeto BIM: O gerente de projeto BIM corresponde a um indivíduo na posição de gerente de projeto, no caso de projetos grandes ou muito complexos este ator pode ser composto por uma equipe. O gerente de projeto BIM é o responsável da empresa contratada para verificar e coordenar as informações trocadas entre as partes interessadas, garantindo a transparência das informações e a interoperabilidade dos modelos desenvolvidos de acordo com o contrato acordado entre o cliente e as empresas. Além das tarefas atribuídas no IDM este ator é o encarregado das análises de interferências entre os modelos de cada disciplina auxiliando na resolução das mesmas, fornece as diretrizes de modelagem, caracteriza os fluxos de informações, os requisitos tecnológicos e as regras de interoperabilidade, além do controle de qualidade dos projetos.

- Gerente de Planejamento: Este ator corresponde ao gerente de planejamento e sua equipe composta por pessoas especializadas em técnicas de construção e demolição, podendo ser cumprido por um setor da empresa especializada em construtibilidade e planejamento. Esta equipe é responsável por avaliar as melhores técnicas de demolição e desmontagem, avaliar a facilidade da montagem de um projeto, assim como possui fontes de informações e de procura para elementos reaproveitados de outros locais, como outras obras na fase de demolição ou locais de armazenamento de materiais provenientes da demolição ou desmante. Além de elaborar o orçamento, cronograma físico e cronograma financeiro de execução da obra.

- Equipe de Sustentabilidade: Este ator corresponde a um setor da empresa contratada composta de uma equipe multidisciplinar, com engenheiros civis, produção e ambientais. Esta equipe é responsável

pela execução da análise de suprimentos e avaliação do ciclo de vida dos materiais.

4.1.1. Mapa de processos

O IDM utiliza as técnicas do BPMN no seu mapa de processos de maneira particular, podendo haver algumas alterações nas restrições impostas por esta abordagem. Em mapas de processos que utilizam a abordagem BPMN as piscinas são utilizadas para representar entidades em envolvidas um processo enquanto que as raias são usadas para particionar estas piscinas para que possam representar diferentes departamentos nesta mesma entidade. Isto acontece para possibilitar o mapeamento do fluxo de trabalho passando de uma entidade para outra, ou seja, de uma piscina para outra.

No IDM desenvolvido neste trabalho as piscinas foram usadas para representar os processos de projeto, de consultoria e do cliente. A piscina do processo de projeto, responsável pelo desenvolvimento dos projetos requisitados pelo cliente, foi dividido em raias entre os atores que compartilham os modelos em ambiente BIM que são o Arquiteto, o Engenheiro Estrutural e o Gerente de Projetos BIM. A piscina do processo de consultoria foi dividida em raias entre a Equipe de Planejamento e a Equipe de Sustentabilidade Ambiental, estes atores recebem informações específicas que são compartilhadas pelo Gerente de Projeto BIM.

Dentro das raias ou piscinas é onde se iniciam ou terminam eventos (representados pelos círculos), mapeiam as tarefas (retângulos), mapeiam a geração de dados e informações (desenho de uma folha de papel), identificam o fluxo do trabalho (seta cheia ou tracejada) e traçam as rotas alternativas que dependem de decisões (losangos) ou as rotas paralelas (losangos com “+”).

O IDM completo é apresentado no Apêndice A, onde o mapa de processos trata dos temas principais das atividades iniciais, do desenvolvimento do projeto de arquitetura, do reaproveitamento dos materiais no local, da consideração do projeto para desmontar e o reaproveitamento de materiais de outros locais. Uma versão ilustrativa é apresentada na Figura 6.

O IDM apresentado mapeia as informações trocadas e as tarefas de cada ator no processo de desenvolvimento de um projeto integrado em ambiente BIM, não excluindo os processos usuais da metodologia BIM, como o compartilhamento dos modelos, a necessidade de reuniões entre as equipes, a análise de interferências entre os modelos e compatibilizações dos projetos.

O mapa de processos inicia com a solicitação do cliente ao definir as premissas do empreendimento desejado, como sua função, os requisitos técnicos e o orçamento que o cliente possui para investir. Neste momento deve ser demandado pelo cliente um estudo de viabilidade para o desenvolvimento de um projeto com baixos índices de impacto ambientais e a possibilidade de utilização de materiais reaproveitados como elementos estruturais de aço.



Figura 6: Versão ilustrativa o IDM desenvolvido com identificação dos assuntos principais.

As premissas definidas pelo cliente são passadas para o gerente de projetos BIM, o qual iniciará a formalização destas premissas em forma de contratos para garantir a realização satisfatória da demanda do cliente, a transparência de informações e as diretrizes de projeto aos demais envolvidos. Para isso o gerente de projetos BIM define quais os serviços que o cliente estará contratando dos projetistas, o nível de detalhamento dos modelos e as datas das entregas dos serviços. Para a melhor interoperabilidade entre os projetistas e consultores o gerente de projetos BIM também define quais os programas, templates e bibliotecas serão utilizados. Após a formalização do contrato com as partes interessadas é iniciada a fase de projeto.

O gerente de projetos BIM contata os projetistas de arquitetura e estrutura que recebem o programa de necessidades do cliente e começam a estudar a volumetria da edificação nova, os métodos construtivos e de demolição ou desmontagem. Concomitantemente o gerente de projetos BIM contata a equipe de planejamento para avaliar a situação do terreno do futuro empreendimento, se não houver alguma construção existente o fluxo de trabalho do gerente de projetos BIM passa para a próxima tarefa, caso contrário a equipe de planejamento tem a tarefa de identificar, classificar e avaliar a possibilidade de desmonte da construção existente para o reaproveitamento dos materiais, a equipe de sustentabilidade ambiental deve realizar o estudo ACV dos cenários de fim da vida útil da construção existente (considerando o descarte, reciclagem ou reuso dos materiais) com estimativas de orçamentos para estes serviços fornecidas pela equipe de planejamento. As informações a respeito da construção existente no terreno alimentam as informações utilizadas pelo projetista estrutural na concepção do projeto de demolição/desmonte, o qual deverá ser avaliado pelo cliente. Neste momento o cliente pode solicitar revisões no projeto de demolição/desmonte ou dar continuidade ao projeto.

Após o estudo de volumetria da edificação nova o arquiteto faz o lançamento inicial da estrutura e define os materiais, em seguida o projeto conceitual de arquitetura é avaliado pelo cliente, neste momento o cliente pode solicitar modificações no projeto de arquitetura e só será dado continuidade ao projeto se o mesmo for aprovado pelo cliente. O projeto conceitual de arquitetura deve ser desenvolvido para o projeto básico e posteriormente para o projeto executivo de arquitetura, mas estas etapas não serão detalhadas neste IDM por questão de simplificação.

Com o projeto conceitual de arquitetura o engenheiro estrutural desenvolve o projeto conceitual de estrutura, a partir deste momento, o projetista estrutural deve avaliar simultaneamente a utilização do projetar para desmontar e a utilização de elementos de reaproveitamento de outros locais. Para isto o gerente de projeto BIM reúne as informações para a equipe de planejamento avaliar o potencial de desmontagem e montagem da nova estrutura, informações que são utilizadas na atualização do projeto estrutural. A equipe de planejamento também faz a busca de elementos estruturais de aço para reuso de outros locais. Com as

informações da existência de elementos reaproveitados no local e de outros locais, projeto conceitual de arquitetura e projeto conceitual de estrutura a equipe de sustentabilidade ambiental têm a tarefa de executar o estudo ACV da construção e propor cenários ou soluções para melhorar o desempenho dos materiais utilizados. Os cenários desenvolvidos podem ser compostos exclusivamente de elementos novos, elementos reaproveitados ou uma mistura entre as duas práticas.

O cliente deve avaliar o projeto conceitual de estrutura, as opções dos cenários propostos e o orçamento desenvolvido para a escolher o cenário que mais o agrada, considerando a sustentabilidade, a economia e o prazo. Caso nenhum cenário proposto satisfaça a demanda do cliente, este pode solicitar revisões até que algum cenário seja aprovado. Após a aprovação do cliente o engenheiro estrutural pode atualizar o projeto conceitual e formalizar o projeto estrutural básico, chegando ao fim do IDM. Vale ressaltar que após o projeto básico estrutural ainda deve ser desenvolvido o projeto executivo de estrutura.

4.2. Estudo de caso (Contexto)

O conjunto de prédios abordados neste estudo de caso estão localizados no centro da cidade do Rio de Janeiro, onde foram realizadas obras de restauração, ampliação e adaptação. O conjunto arquitetônico do início do século XIX é formado por três prédios tombados pelo patrimônio histórico ilustrados na Figura 7. Dois destes prédios foram reconstruídos com estrutura metálica e de concreto, o terceiro prédio de alvenaria estrutural não será considerado no estudo, pois sua estrutura foi preservada e apenas reforçada.

Os dois prédios possuem as fachadas frontais tombadas pelo patrimônio histórico, o interior do primeiro prédio se encontrava em ruínas e sem estrutura interna, o segundo prédio funcionava como escritório e havia sido construído com estrutura metálica havia não mais de 5 anos.

O projeto desenvolvido visava unir o espaço de convívio dos três prédios e não utilizou a metodologia BIM, de modo que os projetistas tinham pouca troca de informações e pouco contato uns com os outros. Os projetos das diversas disciplinas só foram compatibilizados durante a fase da construção, gerando muitos impasses e necessidades de adaptações dos projetos.

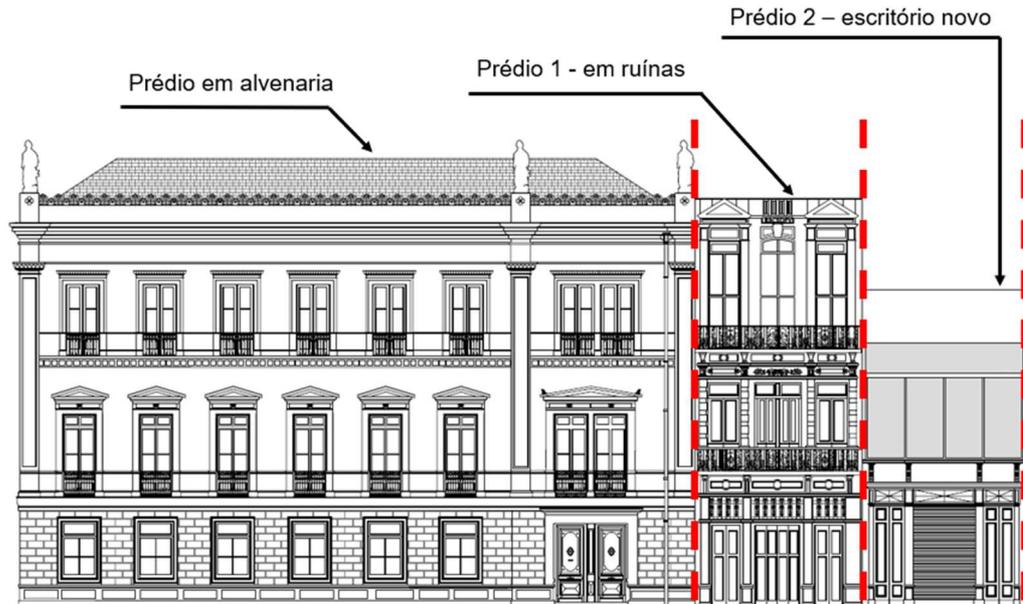


Figura 7: Conjunto de prédios do estudo de caso.

A realização da construção desse conjunto de prédios foi marcada por diversas alterações no projeto durante a fase da construção. As solicitações das mudanças tiveram diversos motivos, como motivos econômicos, estéticos, fiscais e de simplificação da execução. Grande parte das disciplinas de projeto foram impactadas por essas alterações, sendo os projetos arquitetônico e estrutural os mais impactados. Diversos atores foram responsáveis pela solicitação e avaliação das alterações e corroboraram para o resultado final e o alinhamento dos interesses do cliente, projetistas e dos agentes de fiscalização do patrimônio histórico. Vale ressaltar que a sustentabilidade não foi um dos motivos que geraram alterações no projeto, tendo em vista que na época não havia sido feito um estudo da avaliação do ciclo de vida.

O projeto original de estrutura do conjunto de prédios, Figura 8, previa a utilização de perfis novos de aço em sua maior parte, e por determinação da equipe de arquitetura, uma pequena área nos fundos do prédio seria construída com elementos de concreto moldado in loco. As lajes seriam de concreto armado compostas de vigotas treliçadas pré-moldadas, com exceção de uma laje nervurada de concreto no 2º pavimento, sustentada também por vigas de concreto.

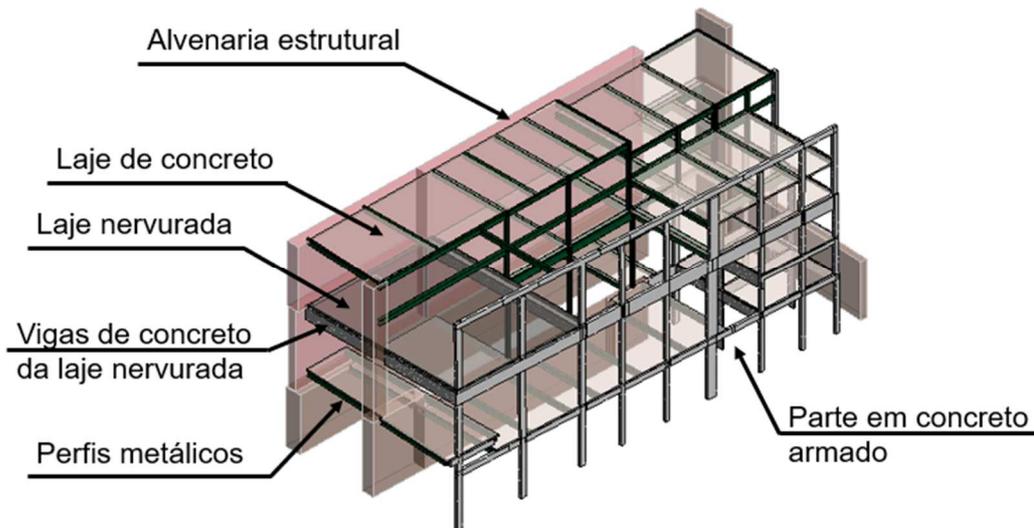


Figura 8: Estrutura do conjunto de prédios.

A primeira grande solicitação de modificação de projeto partiu da equipe de construção para a equipe dos projetistas estruturais, quando questionaram sobre a possibilidade desta parte da estrutura com elementos de concreto armado fosse de estrutura metálica também, e desta forma trabalhar com apenas um sistema construtivo, facilitando a construção. A análise dessa solicitação envolveu o construtor, os projetistas de arquitetura e estrutura. Foi definido que as modificações dos elementos não alterariam a forma e a estética, sendo permitido a substituição solicitada, com exceção das vigas de concreto que sustentariam a laje nervurada por questões estruturais.

O planejamento inicial da obra contemplava a demolição total do segundo prédio para a construção de uma nova estrutura, que permitisse que os três prédios fossem integrados e possuíssem o mesmo nível nos pavimentos. As fachadas tombadas dos dois prédios impossibilitaram a utilização de grandes máquinas na obra, de modo que a demolição foi dada de forma lenta, como uma desconstrução. O prédio demolido apresentava a estrutura metálica nova em boas condições e o método de desmonte adotado infligia poucos danos na mesma.

A segunda grande solicitação novamente partiu da equipe de construção para a equipe do projeto estrutural, desta vez questionando sobre a possibilidade do reaproveitamento dos perfis metálicos que estavam sendo desmontados. A análise da solicitação envolveu os projetistas da estrutura, o construtor e o cliente, e que depois de uma análise da qualidade dos perfis resgatados e uma

reformulação do projeto estrutural permitiram a inclusão dos perfis no projeto final.

Todas as solicitações e tomadas de decisões abordadas neste capítulo ocorreram durante a fase de construção, acarretando em retrabalho nos projetos e em campo, atrasos e alterações nos cronogramas físico e financeiro e no planejamento da obra. Ainda assim as solicitações de alterações foram autorizadas por se constatar que eram as melhores soluções pelo corpo técnico responsável.

Visto que o projeto foi desenvolvido de forma convencional e fora da metodologia BIM, essa troca de informações e ideias não ocorreram mais cedo na fase de projeto. E por isso não foram abordadas inicialmente as questões de reaproveitamento de materiais presentes no canteiro proveniente da demolição e nem a consideração sobre a facilidade da montagem e da construção.

Como visto no IDM apresentado, não foram abordados neste empreendimento os estudos do ACV, a possibilidade da inclusão de perfis metálicos reaproveitados de outros locais e a utilização do projetar para desmontar, o que facilitaria a desmontagem deste conjunto de edifícios para serem reaproveitados novamente no futuro.

4.3. Experimentação do estudo ACV

A avaliação do ciclo de vida tomou como base o contexto e projetos do estudo de caso apresentado e será baseada nas diretrizes das ISO14040 e ISO14044, e será realizada com os bancos de dados disponíveis para atingir o objetivo do estudo. Primeiramente será utilizando o aplicativo Tally (KT Innovations, 2017) em conjunto com o programa Autodesk Revit e posteriormente será feita uma comparação utilizando o banco de dados ICE (Inventário de Carbono e Energia) (Circular Ecology, 2019).

4.3.1. Objetivo e escopo

O objetivo deste estudo ACV é a identificação de oportunidades de melhoria no desempenho ambiental dos materiais empregados no projeto em várias fases do ciclo de vida. Dessa forma a questão ambiental é considerada durante a fase de

projeto em conjunto com as questões econômicas, sociais, técnicas, estéticas e com relação ao tempo.

O limite do sistema será do berço ao túmulo, ou seja, irá incluir diversas fases do ciclo de vida, incluindo as fases de produção (berço), construção, uso e fim da vida (túmulo), que possuem as subdivisões ilustradas na Tabela 4. No presente experimento foi dado foco nos impactos ambientais provenientes dos materiais que constituem as disciplinas de arquitetura e estrutura. Portanto, as emissões devido a energia operacional, água de operação e as subfases da construção no local e do uso não foram consideradas.

A unidade funcional, que segundo a ISO 14044, diz respeito ao desempenho quantificado de um sistema de produto como unidade de referência, será considerado como o conjunto de prédios apresentado. A idade média da vida útil da construção foi considerada de 100 anos.

A ACV pode e deve ser analisada durante várias etapas no processo de execução do projeto, mesmo quando partes do projeto estão com o nível de detalhamento diferentes, pois assim é possível utilizar a ACV para avaliar os impactos ambientais como uma ferramenta de tomada de decisão para alcançar soluções mais sustentáveis desde as fases iniciais até as mais detalhadas do projeto (Cavalliere et al., 2019; Najjar et al., 2017).

Tabela 4: Fases e subfases do ciclo de vida.

Fases do Ciclo de Vida	Subfases
Produção	Extração
	Transporte
	Fabricação
Construção	Transporte
	Construção no local
Uso	Uso
	Manutenção
	Reparo
	Substituição
	Energia Operacional
	Água de operação
Fim da Vida	Demolição
	Transporte
	Processamento de resíduos
	Descarte

O estudo é um experimento da tarefa de ACV executada durante o desenvolvimento do projeto estrutural, apresentado no IDM proposto. Devido ao fluxo de informações antecedente a esta tarefa será considerada a existência das informações sobre materiais provenientes da demolição no local da obra, projeto de arquitetura com o lançamento inicial da estrutura, projeto conceitual de estrutura, possibilidade de busca por materiais de reaproveitamento em outros locais, contato com consultores de construção e demolição e cliente.

As opções e decisões apresentadas do caso real na seção 4.1 serão antecipadas e consideradas ainda na fase de projeto, que irão auxiliar na montagem dos cenários analisados. Com a ACV será possível considerar a sustentabilidade nas tomadas de decisões e assim avaliar se as mudanças ocorridas no projeto reduziram o impacto causado pela construção. Além disso, as modificações serão extrapoladas para a minimização dos impactos ambientais.

É importante ressaltar que não há base científica suficiente para reduzir os resultados da ACV a uma única pontuação ou número geral, uma vez que existem complexidades para os sistemas analisados em diferentes estágios de seu ciclo de vida. Assim como, não há um método único para conduzir estudos de ACV (ISO 14040).

4.3.2. Modelo e cenários

O modelo parametrizado do conjunto de prédios foi criado no programa Autodesk Revit, Figura 9.

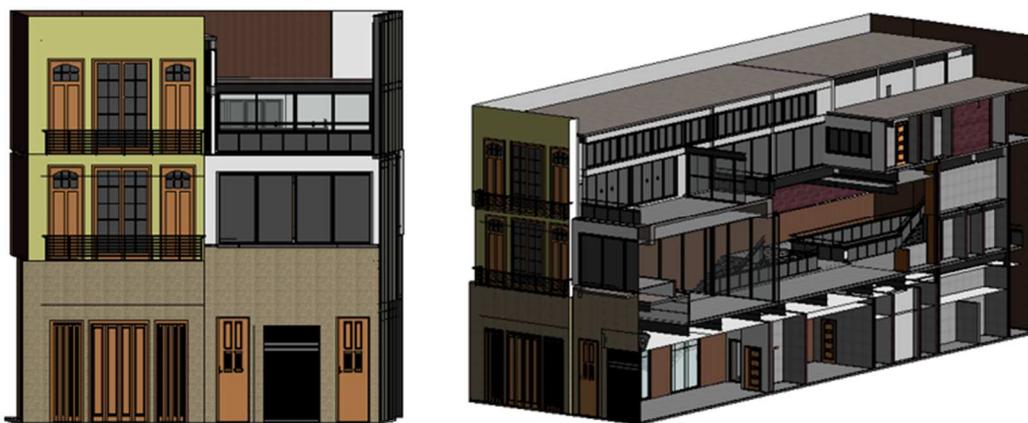


Figura 9: Conjunto de prédios modelados no Autodesk Revit, fachada a esquerda e corte em perspectiva a direita.

Na constituição dos cenários foram considerados os materiais provenientes das disciplinas de arquitetura e estrutura. Os cenários distinguem-se uns dos outros com relação ao material estrutural das vigas e pilares e sua origem, material novo ou reaproveitado, ilustrado na Figura 10.

Quatro alternativas de projeto foram consideradas, sendo elas:

- Cenário 00 - projeto inicial do caso real. Grande parte da estrutura é composta por estrutura metálica nova, e alguns elementos são de concreto armado.
- Cenário 01 – referente à primeira solicitação de mudança do projeto. Todos os elementos de vigas e pilares são de estrutura metálica nova, com exceção das duas vigas de concreto que sustentam a laje nervurada.
- Cenário 02 – projeto real. Referente à segunda solicitação de mudança do projeto. A estrutura é composta por perfis de aço novos em conjunto com perfis de aço reaproveitados da demolição que ocorreu no local, e as duas vigas de concreto que sustentam a laje nervurada.
- Cenário 03 – extrapolação do Cenário 02. Utiliza os perfis de aço reaproveitados da demolição em conjunto com outros elementos de aço reaproveitados de outros locais, e as duas vigas de concreto que sustentam a laje nervurada.

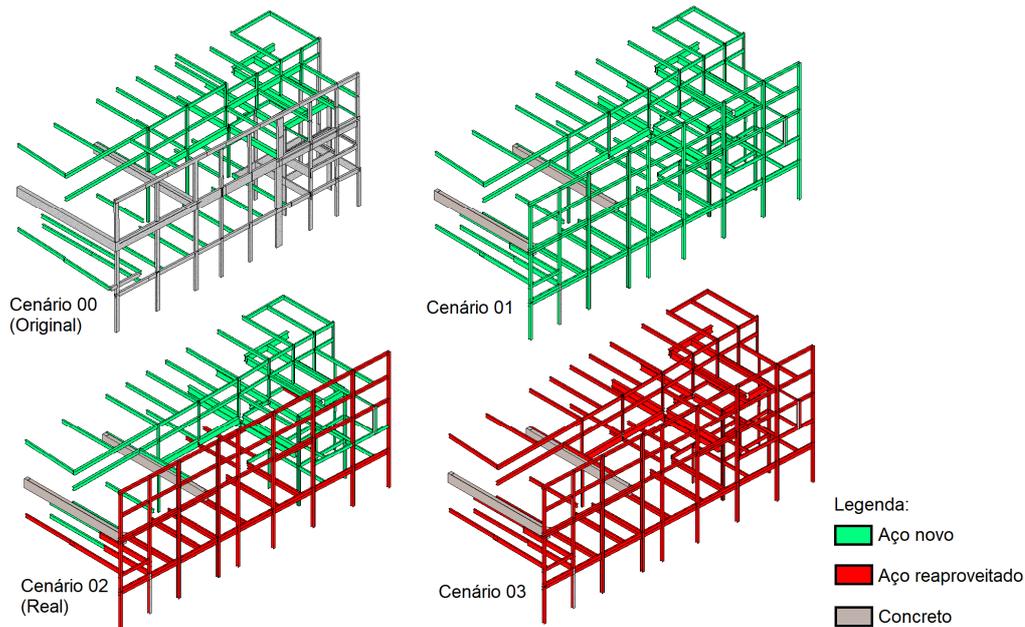


Figura 10: Ilustração das diferenças entre os cenários analisados.

Além das diferenças do tipo e origem dos materiais os projetos dos cenários possuem diferenças quanto ao dimensionamento das peças. Como por exemplo, no caso da utilização dos perfis metálicos que foram reaproveitados no local ocorreu uma readaptação no projeto de estrutura para incluir um conjunto limitado de seções disponíveis.

4.3.3. Aplicativo Tally

Para a avaliação dos impactos ambientais dos materiais da construção foi utilizado o aplicativo Tally, que trabalha diretamente com o modelo no Autodesk Revit. Este aplicativo é a primeira ferramenta de ACV no Autodesk Revit que visa calcular os impactos ambientais dos materiais da construção. O conjunto de dados de ICV em Tally é modelado usando o banco de dados GaBi, e as fontes geográficas são adaptadas para representar a região dos EUA no ano de 2017 (KT Innovations, 2017). Com a utilização do Tally é possível quantificar e medir as categorias dos impactos ambientais com base no limite do sistema selecionado e unidades funcionais. Categorias como o potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial de aquecimento global, potencial de destruição de ozônio, potencial de formação de smog, demanda de energia primária, energia não renovável e energia renovável.

Em posse do projeto modelado no Autodesk Revit o próximo passo para a utilização do aplicativo Tally para a ACV inclui a compatibilização entre os materiais utilizados no modelo Revit e os materiais no banco de dados do Tally. Essa etapa pode ser a mais dispendiosa em tempo pela necessidade de atribuir materiais aos elementos modelados pela segunda vez. Ela é também a mais propícia a erros humanos, pois a atribuição é manual. Dependendo do nível de detalhamento do modelo, esta etapa pode ser exaustiva no primeiro momento. Vale ressaltar que após os materiais serem atribuídos no aplicativo Tally uma primeira vez, estes ficam salvos para uma posterior análise, sendo necessário editar apenas famílias e elementos novos incluídos no modelo Revit.

O aplicativo permite que a análise inclua todas as categorias de materiais, a seleção de apenas algumas delas e uma limitação pelas fases de construção definidas no modelo, tais como: fase existente, de construção nova ou de demolição. A Figura 11 mostra a interface gráfica do aplicativo Tally na etapa de atribuição dos materiais, onde deve-se incluir a vida útil de cada material, a definição dos materiais existentes de reaproveitamento, e um acabamento específico caso necessário. As bolas coloridas ao lado dos materiais identificam que a atribuição está completa (bola verde), atribuição incompleta (bola amarela) e sem atribuição de material (bola sem cor).

Um exemplo das atribuições dos materiais é ilustrado na Tabela 5 para os perfis de aço novo, todas as outras atribuições são apresentadas no Apêndice B.

Tabela 5: Exemplo da atribuição do material dos perfis metálicos novos no aplicativo Tally.

Material Revit	Especificação do material no Tally
Aço, 45-345, New	Steel, W section (wide flange shape) Hot rolled structural steel, AISC - EPD Service Life: Default to building life Existing or salvaged material: No Density: 100 % by vol. Fireproofing: None Finish: None

O aplicativo Tally só permite a geração dos relatórios se a atribuição dos materiais estiver completa para todos os elementos. A Figura 12 mostra a página para geração dos relatórios de ACV. Nesta etapa é necessário informar todos os dados relativos ao projeto, como a expectativa da vida útil da edificação, as

distâncias, os tipos de transportes para cada material e os impactos causados pela construção e a energia de operação. O aplicativo Tally recebe os insumos para energia de construção e ignora a análise de processos de construção ou equipamentos para a condução de ACV (Nizam et al., 2018). Para o estudo da ACV as distâncias e meio de transporte do frete foram definidos com relação ao endereço real da construção e as distribuidoras dos materiais. A análise da energia de construção e a energia de operação não foram considerados.

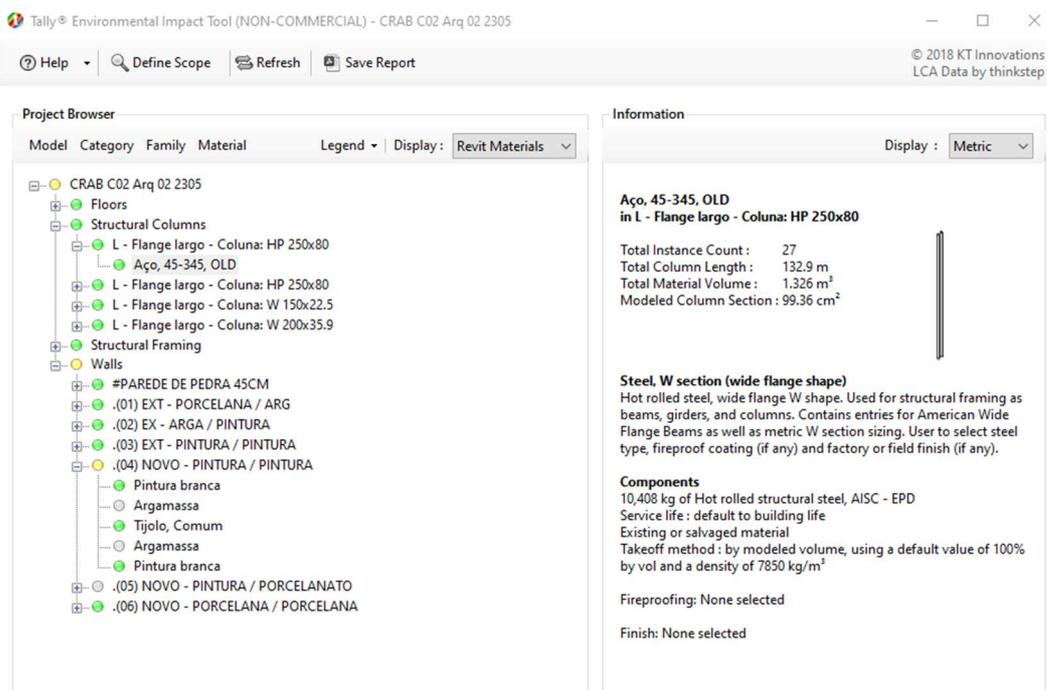


Figura 11: Interface gráfica do aplicativo Tally, página de atribuição de materiais presentes no banco de dados.

O relatório gerado pelo aplicativo Tally pode ser no formato de planilhas no Excel ou em PDF com gráficos e tabelas. Nesta fase, os resultados ICV com a ajuda de métodos de avaliação de impacto utilizados são traduzidos nas categorias de impacto. Os resultados são mostrados com os impactos ambientais separados por fases do ciclo de vida, divididos por família definida do Revit, por materiais e pela classificação do aplicativo Tally. A apresentação de resultados mais coerente será a que proporcionar o cumprimento do objetivo proposto para o estudo. O aplicativo Tally fornece um resultado eficaz e rápido da ACV na fase de projeto (Najjar et al., 2017).

Figura 12: Interface gráfica do aplicativo Tally na página da geração de relatórios.

4.3.4. Banco de dados ICE

O banco de dados ICE (Inventário de Carbono e Energia) é uma tabela para o programa Excel com informações de mais de 200 materiais, divididas em mais de 30 categorias de materiais, sobre a energia incorporada e o carbono incorporado na fase de produção do ciclo de vida. O banco de dados é um compilado de informações disponíveis na literatura, foi montado por um grupo de pesquisa da Universidade de Bath em 2005 e recebe atualizações em intervalos periódicos. As fontes utilizadas representam a região da União Europeia no ano de 2011 (Circular Ecology, 2019).

A Figura 13 mostra a aba principal do banco de dados do ICE, os materiais são listados com relação as categorias, como alumínio, asfalto, concreto, cerâmicas e aços.

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY			
Materials	Embodied Energy & Carbon Coefficients		Comments
	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/kg	
Aggregate			
General (Gravel or Crushed Rock)	0,083	0,0048	0,0052
Estimated from measured UK industrial fuel consumption data			
Aluminium			
Main data source: International Aluminium Institute (IAI) LCA studies (www.world-aluminium.org)			
General	155	8,24	9,16
Assumed (UK) ratio of 25.6% extrusions, 55.7% Rolled & 18.7% castings. Worldwide average recycled content of 33%.			
Virgin	218	11,46	12,79
Recycled	29,0	1,69	1,81
Cast Products	159	8,28	9,22
Virgin	226	11,70	13,10
Recycled	25,0	1,35	1,45
Extruded	154	8,16	9,08
Virgin	214	11,20	12,50
Recycled	34,0	1,98	2,12
Rolled	155	8,26	9,18
Virgin	217	11,50	12,80
Recycled	28	1,67	1,79
Asphalt			
Asphalt, 4% (bitumen) binder content (by mass)	2,86	0,059	0,066
1.68 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Modelled from the bitumen binder content. The fuel consumption of asphalt mixing operations was taken from the Mineral Products Association (MPA). It represents typical UK industrial data. Feedstock energy is from the bitumen content.			
Asphalt, 5% binder content	3,39	0,064	0,071
2.10 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.			
Asphalt, 6% binder content	3,93	0,068	0,076
2.52 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.			
Asphalt, 7% binder content	4,46	0,072	0,081
2.94 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Comments from 4% mix also apply.			

Figura 13: Aba principal do banco de dados ICE.

As categorias de materiais são subdivididas com as variações que os materiais podem possuir, como a resistência do concreto, porcentagem e tipos de aditivos. Nas colunas ao lado são listados os coeficientes relativos a energia incorporada por quilo ($EE - \text{MJ/kg}$), dióxido de carbono por quilo ($EC - \text{kgCO}_2/\text{kg}$) e dióxido de carbono equivalente por quilo, também chamado de potencial de aquecimento global ($EC - \text{kgCO}_2\text{e/kg}$). A última coluna é reservada a comentários sobre a fonte dos dados utilizados e algumas observações. Nas abas seguintes são informados mais detalhes sobre os dados utilizados.

A energia incorporada (EE_m) pela produção do material pode ser calculada multiplicando o volume do material (V_m) pela sua densidade (ρ_m) e o coeficiente de energia incorporada (ee_m). O cálculo do carbono incorporado (EC_m) é similar utilizando o coeficiente do carbono incorporado (ec_m).

O volume do material pode ser obtido pelas tabelas de quantitativos gerado pelo Autodesk Revit, e a densidade para obter a massa pode ser obtida a partir das propriedades do material modelado. Os coeficientes de energia incorporada e carbono incorporado são extraídos diretamente do banco de dados ICE. O volume do material deve ser extraído de todos os elementos modelados e somado para obter a quantidade total de um material (Nizam et al., 2018).

A Equação 01 ilustra o somatório para energia incorporada de um material “m” utilizado em “i” números de elementos modelados.

$$EE_m^{total} = \sum_{i=1}^n EE_m^i = \sum_{i=1}^n V_m^i \rho_m ee_m \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

- EE_m^{total} , energia incorporada total do material em MJ;
- EE_m^i , parcela da energia incorporada do material em MJ;
- V_m^i , parcela de volume do material em m^3 ;
- ρ_m , densidade do material em kg/m^3 ;
- ee_m , coeficiente de energia incorporada em MJ/kg .

Enquanto que a Equação 02 ilustra o somatório para carbono incorporado de um material “m” utilizado em “i” números de elementos modelados.

$$EC_m^{total} = \sum_{i=1}^n EC_m^i = \sum_{i=1}^n V_m^i \rho_m ec_m \quad (\text{Eq. 02})$$

Onde:

- EC_m^{total} , carbono incorporado total do material em kgCO2 ou kgCO2e;
- EC_m^i , parcela de carbono incorporado do material em kgCO2 ou kgCO2e;
- V_m^i , parcela de volume do material em m³;
- ρ_m , densidade do material em kg/m³;
- ec_m , coeficiente do carbono incorporado em kgCO2/kg ou kgCO2e/kg.

Um exemplo das atribuições dos materiais é ilustrado na Tabela 6 para os perfis de aço novo, reaproveitado e concreto, todas as outras atribuições são apresentadas no Apêndice B.

Tabela 6: Exemplo da atribuição dos materiais estruturais (aço e concreto) do banco de dados ICE.

Material Revit	Especificação do material no ICE
Aço, 45-345, New	Steel, Engineering steel - UK (EU)
Aço, 45-345, Old	None
Concreto, 35 MPa Moldado in loco	Concrete, General, 32/40MPa Reinforced Concrete (100kg per m ³ concrete)

A Tabela 7 ilustra o processo de cálculo para o cenário 00 utilizando os coeficientes do banco de dados ICE. A tabela completa com todos os demais cenários é apresentada no Apêndice B.

Tabela 7: Exemplo do cálculo da ACV do cenário 00 utilizando o banco de dados do ICE.

Material Revit	Cenário 00				
	Volume (m³)	Massa (kg)	Energia Incorporada (MJ)	Carbono Incorporado (kgCO2)	Carbono Incorporado (kgCO2eq)
Estrutura					
Aço, 45-345, New	4,11	32.263,50	422.651,85	21.939,18	23.229,72
Aço, 45-345, Old	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	37,81	94.525,00	97.360,75	14.462,33	15.407,58
			147.459,00	10.208,70	10.917,64
Parede					
Argamassa	19,77	29.655,00	32.917,05	5.071,01	5.397,21
Porcelanato 60 x 60	9,07	17.233,00	206.796,00	12.752,42	13.441,74
Pintura Branca	1,07	1.605,00	112.350,00	3.884,10	4.670,55
Tijolo, Comum	61,08	127.046,40	381.139,20	29.220,67	30.491,14
Piso					
Argamassa	24,11	36.165,00	40.143,15	6.184,22	6.582,03
Granito 45 x 90	2,08	5.990,40	65.894,40	3.833,86	4.193,28
Porcelanato cinza 90 x 90	9,97	17.946,00	215.352,00	13.280,04	13.997,88
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	170,18	425.450,00	438.213,50	65.093,85	69.348,35
			309.727,60	21.442,68	22.931,76
Totais			2.470.004,50	207.373,04	220.608,86

5 Resultados

Este capítulo mostra os resultados do experimento da tarefa do estudo de ACV do IDM proposto, as considerações e decisões dos atores responsáveis pelo desenvolvimento do projeto.

5.1. Cálculo de emissões com o aplicativo Tally

O primeiro resultado a ser analisado neste estudo foi a ACV do cenário 00, projeto real com a estrutura em concreto e metálica nova, para identificar o material com maior impacto ambiental. Foi dada maior atenção a métrica de equivalência em dióxido de carbono (kgCO_2eq), ou mais popularmente conhecido como potencial de aquecimento global, por ser uma métrica internacionalmente reconhecida e que expressa a quantidade dos gases de efeito estufa emitidos em termos equivalentes de dióxido de carbono (Borges et al., 2017; Marzouk et al., 2017).

A Figura 14 ilustra o resultado desta primeira análise, a parcela intitulada de “concreto” corresponde ao somatório das emissões do ciclo de vida do concreto estrutural e reforço em aço de lajes, vigas e pilares. A parcela de “alvenaria” corresponde as emissões do ciclo de vida do tijolo, argamassa de assentamento e argamassa revestimento de paredes (emboço e chapisco) e pisos (contrapiso). A parcela de “metais” corresponde as emissões do ciclo de vida dos perfis metálicos e a de “acabamentos” corresponde a parcela de emissões do ciclo de vida dos materiais de porcelanato e pintura de paredes e pisos.

No cenário 00 a métrica do potencial de aquecimento global total do ciclo de vida é igual a 282.775,00 $\text{kg CO}_2\text{eq}$, 57% deste valor corresponde as emissões apenas do concreto armado, o que equivale a 161.181,75 kgCO_2eq . O alto valor das emissões do concreto justifica a substituição de vigas e pilares de concreto por perfis de aço e por elementos reaproveitados nos demais cenários.

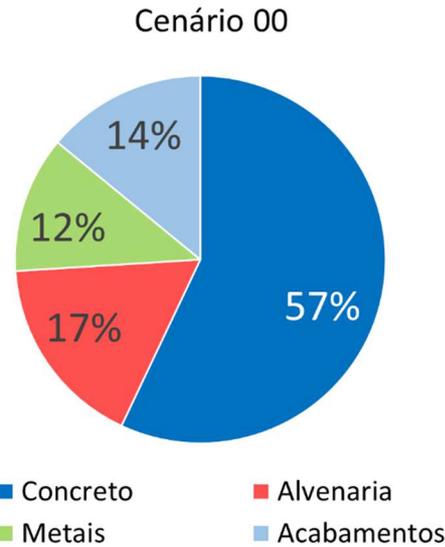


Figura 14: Potencial de aquecimento global do cenário 00 pelo aplicativo Tally.

A Figura 15 mostra a comparação entre os quatro cenários para a métrica de potencial de aquecimento global do ciclo de vida, com as mesmas separações dos materiais em “concreto”, “alvenaria”, “metais” e “acabamentos”.

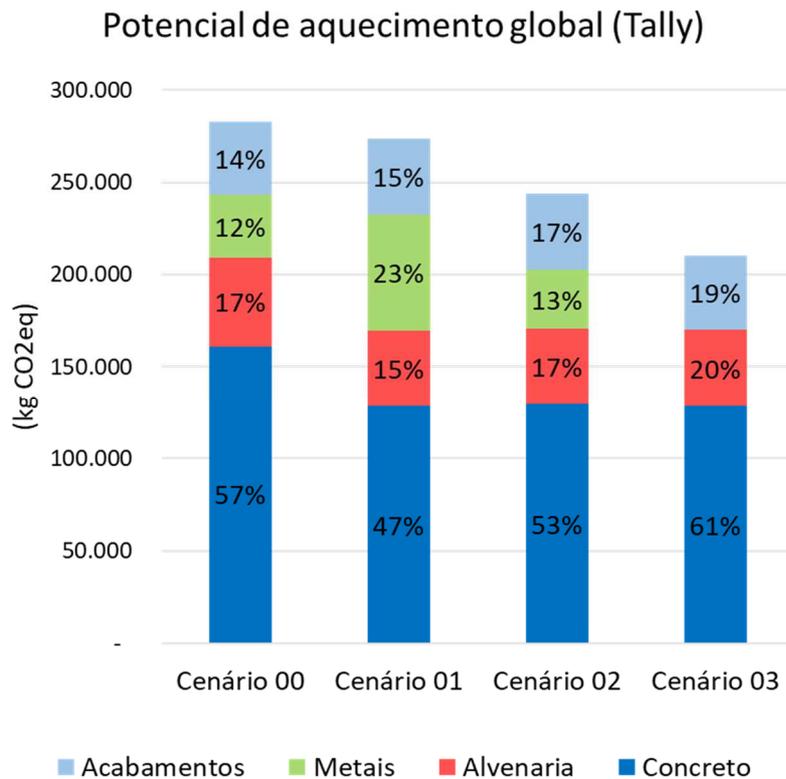


Figura 15: Potencial de aquecimento global dos quatro cenários pelo aplicativo Tally.

Inicialmente, é possível identificar a diminuição do total de emissões no ciclo de vida em cada cenário. No cenário 00 o potencial de aquecimento global

total é igual a 282.775,00 kg CO₂eq, no cenário 01 esta mesma métrica é de 273.547,00 kg CO₂eq com redução de 3,3% em relação ao cenário 00. No cenário 02 (real) o potencial de aquecimento global é de 243.961,00 kg CO₂eq com redução de 13,7% em relação ao cenário 00 e o cenário 03 apresenta o valor total de 210.329,00 kg CO₂eq, sendo o mais baixo entre os cenários e com uma redução de 25,6% em relação ao cenário 00.

Entre os cenários 00 e 01 a parcela das emissões do potencial de aquecimento global para o ciclo de vida do concreto reduziu em 20%, de 161.181,75 kg CO₂eq para 128.567,09 kg CO₂eq, valor que se manteve nos cenários 02 e 03 por não haver mais modificações nos elementos em concreto armado restantes, constituídos por lajes e as vigas de suporte da laje nervurada. O valor da porcentagem do gráfico se altera por causa da redução do valor total das emissões do potencial de aquecimento global.

O aumento das emissões do ciclo de vida dos “metais” entre os cenários 00 e 01, de 33.933,00 kg CO₂eq para 62.915,81 kg CO₂eq, é decorrente da substituição das vigas e pilares de concreto para perfis metálicos. No cenário 02 a quantidade de emissões reduz para 31.714,93 kg CO₂eq, devido a utilização de materiais reaproveitados no local, e neste caso se exclui as emissões da produção dos perfis metálicos e transporte. No cenário 03 a parcela das emissões do ciclo de vida dos metais some, já que neste cenário todos os perfis metálicos são de reaproveitamento.

Não houve mudanças no projeto que impactavam os valores dos materiais nas categorias de “alvenaria” e “acabamentos”, de modo que estes valores permaneceram constantes nos quatro cenários.

5.2. Cálculo de emissões com o banco de dados ICE

O primeiro resultado a ser analisado neste estudo também foi a ACV do cenário 00, projeto real com a estrutura em concreto e metálica nova, pela métrica de equivalência em dióxido de carbono (kgCO₂eq). A Figura 16 ilustra o resultado desta primeira análise. As parcelas “concreto”, “alvenaria”, “metais” e “acabamentos” seguem a mesma definição descrita no item 5.1.

No cenário 00 a métrica do potencial de aquecimento global total da fase de produção dos materiais é igual a 220.608,86 kg CO₂eq, 54% deste valor corresponde as emissões apenas do concreto armado, o que equivale a 118.605,32 kgCO₂eq. Tanto a ACV com o Tally quanto a ACV com o banco de dados ICE mostram um alto valor nas emissões do concreto armado, logo, independentemente da ferramenta usada no desenvolvimento da ACV seria buscado a melhoria no desempenho do material concreto armado, justificando a substituição de vigas e pilares de concreto por perfis de aço e por elementos reaproveitados nos demais cenários.

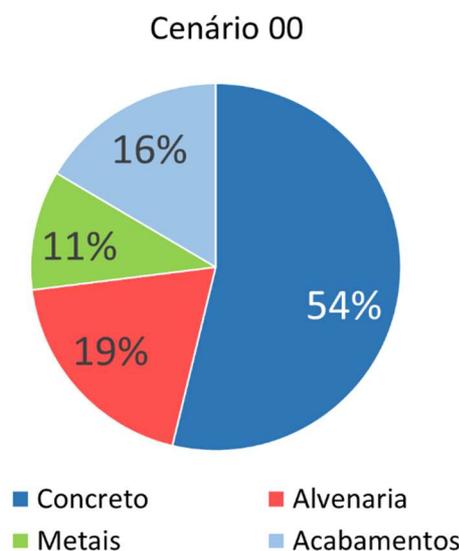


Figura 16: Potencial de aquecimento global do cenário 00 pelo banco de dados ICE.

A Figura 17 mostra a comparação entre os quatro cenários para a métrica de potencial de aquecimento global da fase de produção, com as mesmas separações dos materiais em “concreto”, “alvenaria”, “metais” e “acabamentos”.

Inicialmente, é possível identificar a diminuição do total de emissões na fase de produção em cada cenário. No cenário 00 o potencial de aquecimento global

total é igual a 220.608,86 kg CO₂eq, no cenário 01 esta mesma métrica é de 219.265,39 kg CO₂eq com redução de 0,6% em relação ao cenário 00. No cenário 02 (real) o potencial de aquecimento global é de 199.652,95 kg CO₂eq com redução de 9,5% em relação ao cenário 00 e o cenário 03 apresenta o valor total de 177.779,71 kg CO₂eq, sendo o mais baixo entre os cenários e com uma redução de 19,4% em relação ao cenário 00.

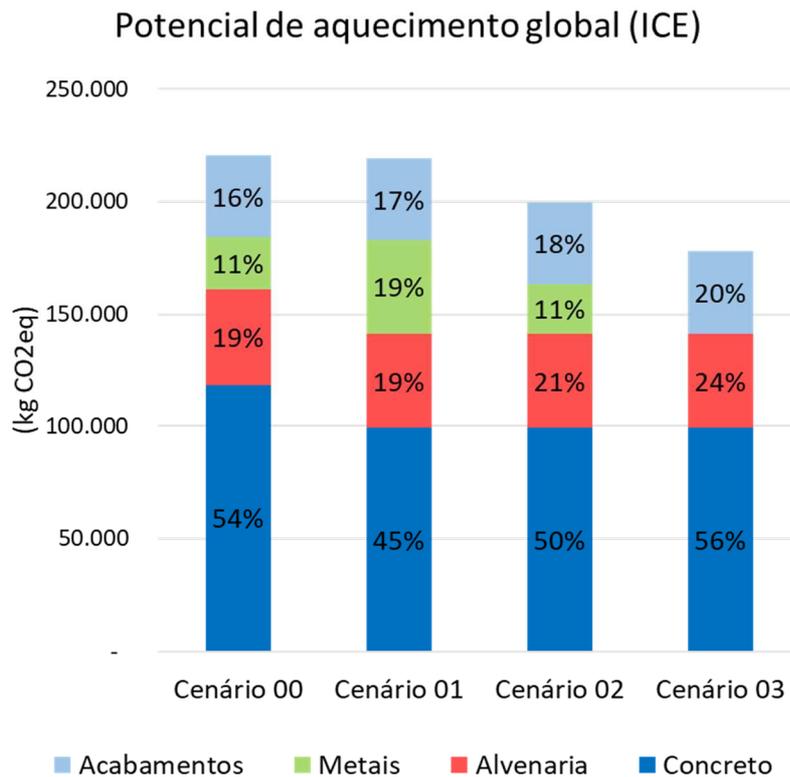


Figura 17: Potencial de aquecimento global dos quatro cenários pelo banco de dados ICE.

Entre os cenários 00 e 01 a parcela das emissões do potencial de aquecimento global para a fase de produção do concreto reduziu em 16,5%, de 118.605,32 kg CO₂eq para 99.005,88 kg CO₂eq, valor que se manteve nos cenários 02 e 03 por não haver mais modificações nos elementos em concreto armado restantes, constituídos por lajes e as vigas de suporte da laje nervurada.

O aumento das emissões do ciclo de vida dos “metais” entre os cenários 00 e 01, de 23.229,72 kg CO₂eq para 41.485,85 kg CO₂eq, é decorrente da substituição das vigas e pilares de concreto para perfis metálicos. No cenário 02 a quantidade de emissões reduz para 21.873,45 kg CO₂eq, devido a utilização de materiais reaproveitados no local, e neste caso se exclui as emissões da produção dos perfis metálicos. No cenário 03 a parcela das emissões do ciclo de vida dos

metais some, já que neste cenário todos os perfis metálicos são de reaproveitamento.

Não houve mudanças no projeto que impactavam os valores dos materiais nas categorias de “alvenaria” e “acabamentos”, de modo que estes valores permaneceram constantes nos quatro cenários.

5.3. Comparações entre os experimentos

As ferramentas utilizadas no desenvolvimento da ACV possuem diferenças quanto as métricas de impactos ambientais analisados, fases do ciclo de vida, metodologia e banco de dados utilizado. A Tabela 8 apresenta as métricas utilizada em cada ferramenta enquanto que a Tabela 9 apresenta as fases do ciclo de vida considerada na ACV em cada ferramenta.

Tabela 8: Impactos ambientais mensurados pelo aplicativo Tally e pelo banco de dados ICE.

Impactos Ambientais	Tally	ICE
Potencial de aquecimento global (kg CO ₂ eq)	√	√
Acidificação (kg SO ₂ eq)	√	
Eutrofização (kg Neq)	√	
Formação de Smog (kg O ₃ eq)	√	
Depleção do ozônio (kg CFC-11eq)	√	
Energia primária (MJ)	√	√
Energia não renovável (MJ)	√	
Energia renovável (MJ)	√	
Dioxido de carbono (kg CO ₂)		√

Tabela 9: Fases do ciclo de vida considerados na ACV pelo aplicativo Tally e pelo banco de dados ICE.

Fases do Ciclo de Vida	Tally	ICE
Produção	√	√
Transporte	√	
Manutenção e Reposição	√	
Fim da Vida	√	
Módulo D	√	

Além disto, o aplicativo Tally e o banco de dados ICE caracterizam regiões e períodos diferentes, o Tally caracteriza os EUA em 2017, enquanto que o banco de dados ICE diz respeito a União Europeia em 2011. Independentemente das diferenças entre as ferramentas a análise inicial do cenário 00 mostrou a necessidade de modificar o projeto para reduzir as emissões causadas pelo concreto armado, para melhorar o desempenho dos materiais utilizados na

construção. Essencialmente essas diferenças estão associadas a questões geográficas e de tempo, pois isto impacta severamente na quantificação das emissões pela produção de materiais em cada país por causa das técnicas utilizadas e distâncias características.

A Figura 18 ilustra a comparação entre o potencial de aquecimento global (carbono incorporado) da fase de produção dos quatro cenários pelas duas ferramentas. Enquanto a Figura 19 ilustra a comparação entre a energia incorporada da fase de produção dos quatro cenários pelas duas ferramentas.

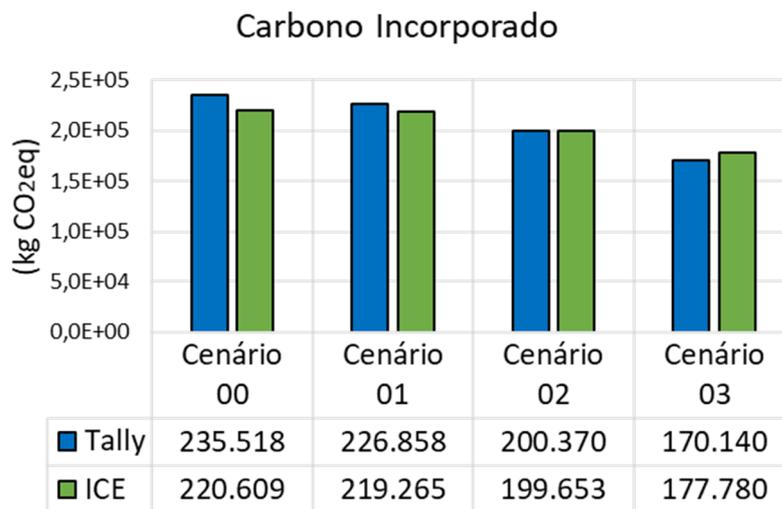


Figura 18: Carbono incorporado na fase de produção pelas duas ferramentas.

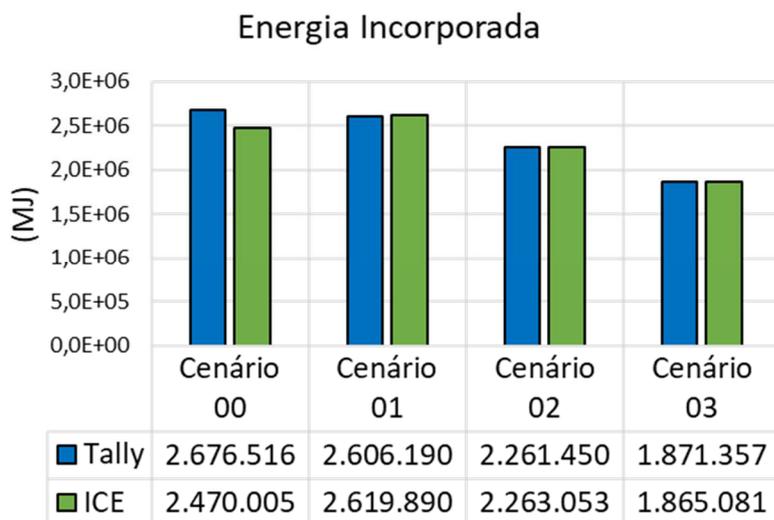


Figura 19: Energia incorporada na fase de produção pelas duas ferramentas.

As diferenças entre os valores de carbono incorporado e energia incorporada foram pequenas, chegando no máximo a 7,7% no caso da energia

incorporada no cenário 00 e 6,3% no caso do carbono incorporado também do cenário 00, as demais diferenças permaneceram abaixo de 3%.

5.4. Discussões dos resultados

O estudo ACV dos cenários mostrou que as decisões tomadas pelos responsáveis do projeto real resultaram em uma diminuição do impacto ambiental causado pela construção, mesmo essa não tendo sido uma questão considerada e nem analisada. Isso indica que a avaliação ambiental nem sempre vai contra os interesses econômicos, práticos, estéticos e de prazo do projeto. Além disso a ACV incluída como mais um parâmetro nas tomadas de decisão aprimoraria a identificação de oportunidades de melhoria no desempenho ambiental dos materiais empregados no projeto em várias fases do ciclo de vida. É importante notar que fatores sociais não foram considerados no projeto real nem no estudo aqui desenvolvido.

No experimento desenvolvido ainda foram encontradas oportunidades de melhoria no desempenho ambiental dos materiais que não foram explorados no caso real, incluindo materiais de reaproveitamento de outros locais, análise de outras opções materiais com menor impacto ambiental e utilização das técnicas do projetar para desmontar.

A redução das emissões do ciclo de vida do concreto armado poderia ser ainda mais profundamente analisada. A continuação da ACV deverá incluir alternativas para a laje de concreto armado, como laje em steel deck e laje com materiais de enchimento como elementos em cerâmica e isopor. Alternativas para as alvenarias poderá incluir paredes em dry-wall.

A utilização do projetar para desmontar não impactaria diretamente nos resultados da ACV, mas possibilitaria que futuramente mais materiais estivessem em condições para serem disponibilizados para a reutilização.

A ACV executada no aplicativo Tally mostrou que o cenário com menor impacto ambiental considerando a métrica de potencial de aquecimento global é o cenário 03, com a estrutura com elementos metálicos reaproveitados no local e de locais externos. A possibilidade de incluir perfis metálicos de outros locais não

foi considerada no caso real, sendo construído o projeto relacionado ao cenário 02.

A Figura 20 mostra a análise da variação da distância do transporte dos elementos metálicos de outros locais. As emissões do potencial de aquecimento global das fases de produção e transporte de todos os materiais, mostra que a emissão do cenário 02 é de 204.927 kg CO₂eq. As emissões do cenário 03, considerando que os elementos que serão de perfil metálicos reaproveitados de outro local estão a uma distância de 100km e sendo transportados por caminhões é de 174.900 kg CO₂eq. Variando a distância dos perfis metálicos transportados para 10.000km chegamos a uma emissão de 191.276 kg CO₂eq, e só se aproxima a emissão causada pelo cenário 02 quando a distância do transporte passa a ser 18.000km, com 204.852 kg CO₂eq.

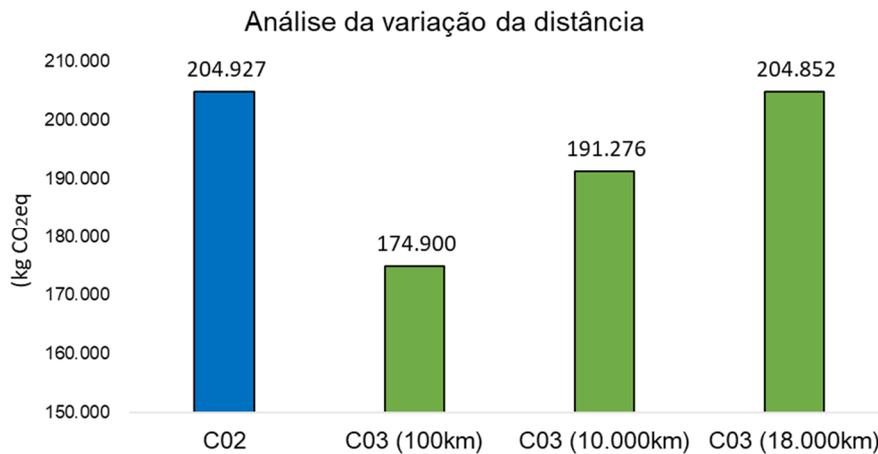


Figura 20: Análise da variação da distância dos perfis metálicos reaproveitados de outros locais no cenário 03.

A utilização de elementos de reaproveitamento a uma distância de 18.000km seria limitado pelo preço das peças e do próprio frete, além do prazo para recebimento na obra. Ou seja, qualquer peça incluída no projeto a uma distância menor ou igual a 18.000km traria redução dos impactos ambientais da construção.

6 Conclusões

A revisão estruturada da literatura (SLR – *Structured Literature Review*) orientou esta pesquisa e seus produtos. Ela mostrou que o desenvolvimento de projetos sustentáveis com baixos índices de impactos ambientais enfrenta limitações, como a falta da demanda do cliente, inexperiência dos projetistas e do setor AEC, dificuldades com a acessibilidade de informações e ferramentas para análises e suas interpretações. Em contrapartida, a crescente preocupação com a preservação e a correta utilização das matérias primas e insumos terrestres ocasionaram criações de tratados, acordos e leis que estimulam pesquisas e mudanças de hábitos e processos em diversos setores. A SRL mostra justamente a busca por adaptação do setor da construção civil ao integrar a metodologia BIM com o conceito de ciclo de vida e outras técnicas de construção, como o projetar para desmontar.

Apesar de não terem sido encontradas pesquisas que abordem coletivamente todos os três conceitos significativamente esta possibilidade é perceptível e até citada em alguns estudos. Devido a isto, o presente trabalho explorou a sinergia em um IDM, onde ilustra o fluxo de informações presente no desenvolvimento de um projeto em ambiente BIM, utilizando os resultados do estudo ACV para otimizar a solução de utilização de materiais estruturais a partir de elementos reutilizados. O experimento do estudo ACV utilizando quatro cenários de um conjunto de prédios restaurados e ampliados no centro da cidade do Rio de Janeiro desenvolveu a tarefa do estudo ACV proposto no IDM que tem como objetivo auxiliar a tomada de decisões dos atores envolvidos no desenvolvimento do projeto.

O método de pesquisa aplicado possibilitou as seguintes conclusões:

- A consideração das questões ambientais nem sempre vai contra os interesses econômicos, práticos, estéticos e de prazo, visto que a solução utilizada no caso real trouxe mitigações nas emissões de dióxido de carbono equivalente e de outros no ciclo de vida da construção;

- A ACV incluída como mais um parâmetro nas tomadas de decisão aprimoraria a identificação de oportunidades de melhoria no desempenho ambiental dos materiais empregados no projeto em várias fases do ciclo de vida;
- Independentemente da ferramenta usada no desenvolvimento do estudo ACV seria buscado a melhoria no desempenho do material concreto armado, justificando a substituição de vigas e pilares de concreto por perfis de aço e por elementos reaproveitados nos demais cenários;
- A análise da distância de transporte dos elementos metálicos reaproveitados indicou que qualquer inclusão de elementos reaproveitados a uma distância menor ou igual a 18.000 km traz uma redução do impacto ambiental causado pela construção. Neste caso o limitador passaria a ser a questão financeira e de tempo do frete. Além da existência do elemento desejado no mercado;
- A interação entre os atores durante o desenvolvimento do projeto reduziria a necessidade de modificações de projeto e serviços durante a fase de construção, além de dar a oportunidade de as ideias serem melhores formuladas e analisadas;
Algumas recomendações para futuras pesquisas nessa área incluem:
 - Explorar a possibilidade de reutilizar outros materiais provenientes da construção e demolição;
 - Mitigar o impacto ambiental utilizando outras técnicas na fase de projeto, como o aperfeiçoamento nas escolhas de materiais nas disciplinas de arquitetura, instalações e estrutura;
 - Estudo de viabilidade econômica em conjunto com o estudo ACV.
 - Incluir a análise da energia operacional em conjunto com o impacto ambiental dos materiais empregados na edificação;
 - Mapeamento do fluxo de trabalho e informações da desmontagem de uma edificação projetada para desmontar, considerando a edificação como um projeto temporário ou uma edificação adaptável.

- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., Davila Delgado, M., Bilal, M., & Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. **Resources, Conservation and Recycling**, 129(May 2017), 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Omoteso, K., Bilal, M., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., ... Owolabi, H. A. (2019). Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, 223, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.172>
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., & Chandra, L. R. (2014). Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling. **Automation in Construction**, 37, 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.017>
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., & Arawomo, O. O. (2018). Designing out construction waste using BIM technology: Stakeholders' expectations for industry deployment. **Journal of Cleaner Production**, 180, 375–385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.022>
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Bilal, M., Ajayi, S. O., Owolabi, H. A., Alaka, H. A., & Bello, S. A. (2015). Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS). **Resources, Conservation and Recycling**, 105, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.018>
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Omoteso, K., Ajayi, S. O., Bilal, M., Owolabi, H. A., ... Henry Looney, J. (2017). BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities. **International Journal of Sustainable Built Environment**, 6(1), 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2017.01.002>
- Arrigoni, A., Zucchinelli, M., Collatina, D., & Dotelli, G. (2018). Life cycle

environmental benefits of a forward-thinking design phase for buildings: the case study of a temporary pavilion built for an international exhibition. **Journal of Cleaner Production**, 187, 974–983.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.230>

Assefa, G., & Ambler, C. (2017). To demolish or not to demolish: Life cycle consideration of repurposing buildings. **Sustainable Cities and Society**, 28, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.011>

Barros, N. N., Ruschel, R. C., & Silva, V. G. da. (2015). Impacto Da Adoção De Bim Na Avaliação De Energia Incorporada Do Ciclo De Vida De Edificações. **IV Simpósio Brasileiro De Qualidade Do Projeto No Ambiente Construído**, (January 2018), 120.

Barros, N. N., & Silva, V. G. da. (2017). BIM na avaliação do ciclo de vida de edificações: revisão da literatura e estudo comparativo. **PARC Pesquisa Em Arquitetura e Construção**, 7(2), 89. <https://doi.org/10.20396/parc.v7i2.8645401>

Borges, J. G., Caldas, L. R., Paulse, P. D. C., Hora, K. E. R., & Carvalho, M. T. M. (2017). Uso do BIM no processo de quantificação de emissões de CO2 no projeto de edificações: estudo de caso para o software DesignBuilder. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, 14(1), 142–156. <https://doi.org/10.5216/reec.v14i1.47802>

Brambilla, G., Lavagna, M., Vasdravellis, G., & Castiglioni, C. A. (2019). Environmental benefits arising from demountable steel-concrete composite floor systems in buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, 141(October 2018), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.014>

Broadbent, C. (2016). Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 21(11), 1658–1665. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1081-1>

Bueno, C., & Fabricio, M. M. (2016). Aplicação da modelagem de informação da construção (BIM) para a realização de estudos de avaliação de ciclo de vida de edifícios. **Pós**, 23, 96–121. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v23i40p96-121>

Bueno, C., & Fabricio, M. M. (2018). Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. **Automation in Construction**,

- 90(January 2016), 188–200. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>
- Bueno, C., Hauschild, M. Z., Rossignolo, J. A., Ometto, A. R., & Mendes, N. C. (2016). Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: A case study on building materials. **Journal of Cleaner Production**, 112, 2208–2220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.006>
- Bueno, C., Pereira, L. M., & Fabricio, M. M. (2018). Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages: an application using building information modelling. **Architectural Engineering and Design Management**, 14(5), 332–346. <https://doi.org/10.1080/17452007.2018.1458593>
- BuildingSMART - International Alliance for Interoperability (2010). Information Delivery Manual: Guide to Components and Development Methods.
- Caldas, L., Nascimento, M., Carvalho, M., & Sposto, R. (2015). Diagnóstico da produção científica relacionada à aplicação do BIM à metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). **XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**.
- Cavalliere, C., Dell’Osso, G. R., Pierucci, A., & Iannone, F. (2018). Life cycle assessment data structure for building information modelling. **Journal of Cleaner Production**, 199, 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.149>
- Cavalliere, C., Habert, G., Dell’Osso, G. R., & Hollberg, A. (2019). Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process. **Journal of Cleaner Production**, 211, 941–952. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.247>
- Chong, H. Y., Lee, C. Y., & Wang, X. (2017). A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, 142, 4114–4126. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.222>
- Conejos, S., Langston, C., & Smith, J. (2013). AdaptSTAR model: A climate-friendly strategy to promote built environment sustainability. **Habitat International**, 37, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.12.003>
- Conti, L., Barbari, M., & Monti, M. (2016). Design of Sustainable Agricultural Buildings. A Case Study of a Wine Cellar in Tuscany, Italy. **Buildings**, 6(2), 17. <https://doi.org/10.3390/buildings6020017>
- De Carvalho, H. J. S., & Scheer, S. (2015). A utilização de modelos BIM na gestão de resíduos de construção e demolição, **VII Encontro de Tecnologia de**

Informação e Comunicação na Construção, 245–255.
<https://doi.org/10.5151/engpro-tic2015-022>

De Oliveira, E., Scheer, S., & Tavares, S. F. (2015). Avaliação de impactos ambientais pré-operacionais em projetos de edificações e a modelagem da informação da construção. **VII Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção**, 179–191. <https://doi.org/10.5151/engpro-tic2015-016>

Denis, F., Vandervaeren, C., & De Temmerman, N. (2018). Using Network Analysis and BIM to Quantify the Impact of Design for Disassembly. **Buildings**, 8(8), 113. <https://doi.org/10.3390/buildings8080113>

Densley Tingley, D., Cooper, S., & Cullen, J. (2017). Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective. **Journal of Cleaner Production**, 148, 642–652.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.006>

Densley Tingley, D., & Davison, B. (2012). Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. **Building and Environment**, 57, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.005>

Dunant, C. F., Drewniok, M. P., Sansom, M., Corbey, S., Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2018). Options to make steel reuse profitable: An analysis of cost and risk distribution across the UK construction value chain. **Journal of Cleaner Production**, 183, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.141>

Eberhardt, L. C. M., Birgisdóttir, H., & Birkved, M. (2019). Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly. **Building Research and Information**, 47(6), 666–680. <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458>

Eckelman, M. J., Brown, C., Troup, L. N., Wang, L., Webster, M. D., & Hajjar, J. F. (2018). Life cycle energy and environmental benefits of novel design-for-deconstruction structural systems in steel buildings. **Building and Environment**, 143(April), 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.017>

European Commission, **EC**, Embodied Energy, 2019. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/eu-buildings-factsheets-topics-tree/embodied-energy>. Acesso em: 31 jul. 2019.

European Commission, **EC** - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, ILCD Handbook: Framework and requirements for LCIA

models and indicators First edition, First, Luxembourg: Publications Office of the European Union, Italy. (<http://dx.doi.org/10.2788/38719>).

Evangelista, P. P. A., Kiperstok, A., Torres, E. A., & Gonçalves, J. P. (2018). Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). **Construction and Building Materials**, 169, 748–761. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045>

Gan, V. J. L., Deng, M., Tse, K. T., Chan, C. M., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2018). Holistic BIM framework for sustainable low carbon design of high-rise buildings. **Journal of Cleaner Production**, 195, 1091–1104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.272>

Ge, X. J., Livesey, P., Wang, J., Huang, S., He, X., & Zhang, C. (2017). Deconstruction waste management through 3d reconstruction and bim: a case study. **Visualization in Engineering**, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40327-017-0050-5>

Giesekam, J., Barrett, J., Taylor, P., & Owen, A. (2014). The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. **Energy and Buildings**, 78, 202–214.

Gómez de Cózar, J. C., Martínez, A. G., López, Í. A., & Alfonsea, M. R. (2019). Life cycle assessment as a decision-making tool for selecting building systems in heritage intervention: Case study of Roman Theatre in Itálica, Spain. **Journal of Cleaner Production**, 206, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.169>

Graf, H. F., Marcos, M. H. C., Tavares, S. F., & Scheer, S. (2012). Estudo de viabilidade do uso de bim para mensurar impactos ambientais de edificações por energia incorporada e CO2 incorporado. **XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído**, (14), 3571–3577.

Iacovidou, E., & Purnell, P. (2016). Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse. **Science of the Total Environment**, 557–558, 791–807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.098>

Iacovidou, E., Purnell, P., & Lim, M. K. (2018). The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? **Journal of Environmental Management**, 216, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.093>

ICE Database. Embodied Energy and Carbon. Disponível em:
<<http://www.circularecology.com>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

International Standard Organisation, ISO, (2006a). **ISO 14040** - Environmental management—Life cycle assessment: Principles and framework.

International Standard Organisation, ISO, (2006b). **ISO 14044** - Environmental management—Life cycle assessment: Requirements and Guidelines.

International Standard Organisation, ISO, (2016). **ISO 29481-1** - Building information models — Information delivery manual — Part 1: Methodology and format.

Jrade, A., & Jalaei, F. (2013). Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage. **Building Simulation**, 6(4), 429–444. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0120-0>

Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in SE. **UK**. <https://doi.org/10.1145/1134285.1134500>

Koutamanis, A., van Reijn, B., & van Bueren, E. (2018). Urban mining and buildings: A review of possibilities and limitations. **Resources, Conservation and Recycling**, 138(April), 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.024>

Krantz, J., Larsson, J., Lu, W., & Olofsson, T. (2015). Assessing Embodied Energy and Greenhouse Gas Emissions in Infrastructure Projects. **Buildings**, 5(4), 1156–1170. <https://doi.org/10.3390/buildings5041156>

KT Innovations, **Tally**, Methods, 2016. Disponível em:
<<http://choosetally.com/methods/>>. Acesso em: 7 fev. 2019.

MeetTally, **Tally**, 2016. Disponível em: <<http://choosetally.com/>>. Acesso em: 7 fev. 2019.

Lanfang, L., Issam, S., Chong, W. K., & Christopher, H. (2015). Integrating G2G, C2C and resource flow analysis into life cycle assessment framework: A case of construction steel's resource loop. **Resources, Conservation and Recycling**, 102, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.009>

Langston, C., Wong, F. K. W., Hui, E. C. M., & Shen, L. Y. (2008). Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. **Building and Environment**, 43(10), 1709–1718. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.017>

Machado, F., & Moreira, L. (2015). O uso de ferramentas BIM na otimização do método de avaliação do ciclo de vida da edificação. **VII Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção**.

Marzouk, M., Abdelkader, E. M., & Al-Gahtani, K. (2017). Building information modeling-based model for calculating direct and indirect emissions in construction projects. **Journal of Cleaner Production**, 152, 351–363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.138>

Medeiros, L. M., Durante, L. C., & Callejas, I. J. A. (2018). Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, 18(2), 365–385. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200259>

Najjar, M., Figueiredo, K., Palumbo, M., & Haddad, A. (2017). Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. **Journal of Building Engineering**, 14(March), 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.10.005>

Ness, D., Swift, J., Ranasinghe, D. C., Xing, K., & Soebarto, V. (2015). Smart steel: New paradigms for the reuse of steel enabled by digital tracking and modelling. **Journal of Cleaner Production**, 98, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.055>

Nizam, R. S., Zhang, C., & Tian, L. (2018). A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings. **Energy and Buildings**, 170, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.067>

Pongiglione, M., Calderini, C., & Guy, G. B. (2017). A new demountable seismic-resistant joint to improve industrial building reparability. **International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment**, 8(3), 251–262. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-06-2016-0026>

Salama, W. (2017). Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, 6(2), 617–635. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.03.005>

Sanchez, B., & Haas, C. (2018). A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings. **Journal of Cleaner Production**, 183, 998–1010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.201>

United States Environmental Protection Agency, **EPA**, Overview of Greenhouse Gases, 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

United States Environmental Protection Agency, **EPA**, Indicators: Acidification, 2016. Disponível em: <<https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-acidification>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

United States Environmental Protection Agency, **EPA**, Nutrient Pollution: The issue, 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/nutrientpollution/issue>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

United States Environmental Protection Agency, **EPA**, Ozone Layer Protection, 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ozone-layer-protection>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

United States Environmental Protection Agency, **EPA**, Ground-level Ozone Pollution, 2019. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ozone-pollution>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

Vitale, P., Spagnuolo, A., Lubritto, C., & Arena, U. (2018). Environmental performances of residential buildings with a structure in cold formed steel or reinforced concrete. **Journal of Cleaner Production**, 189, 839–852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.088>

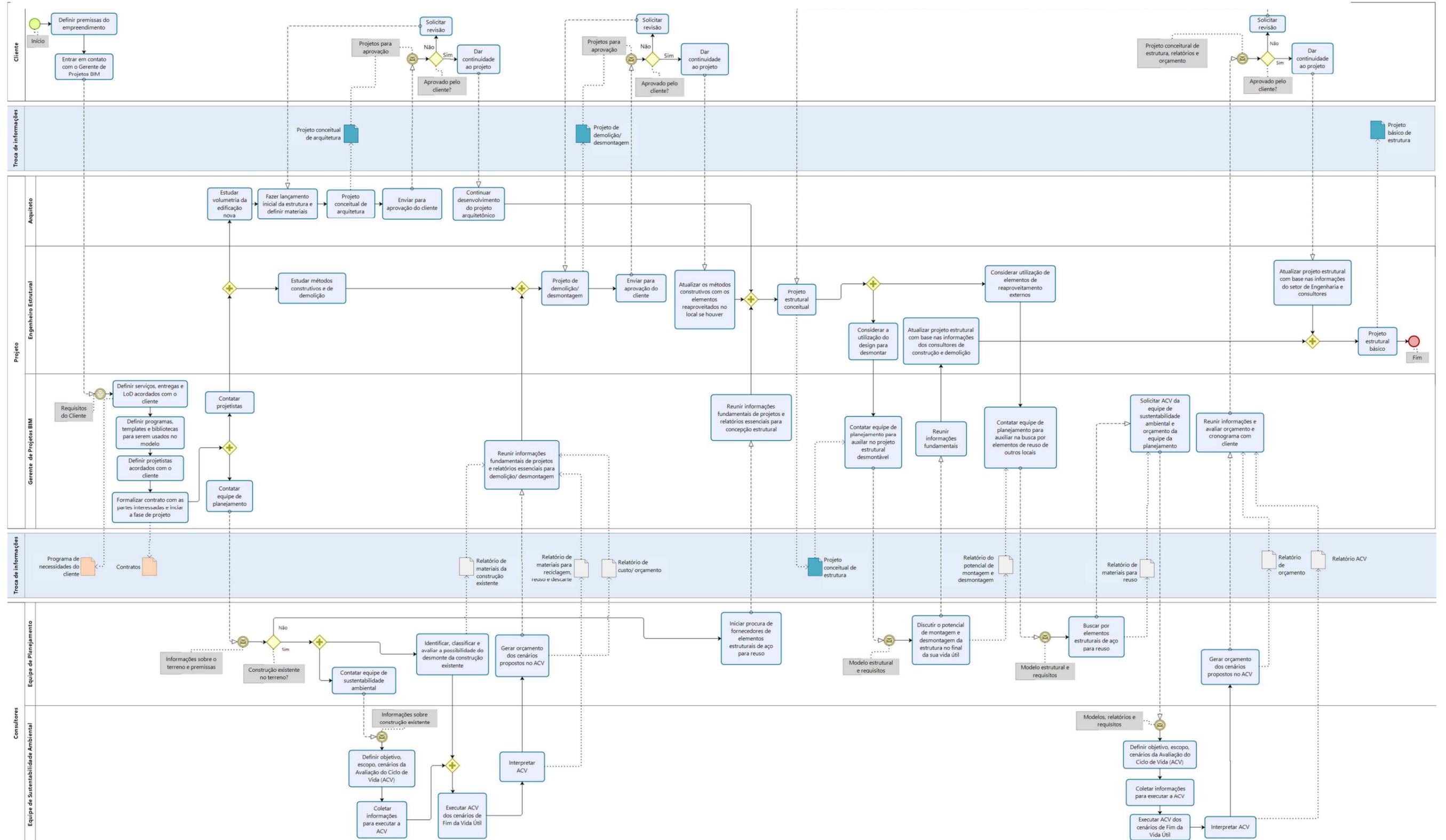
Yang, X., Hu, M., Wu, J., & Zhao, B. (2018). Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China. **Journal of Cleaner Production**, 183, 729–743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.070>

Yeung, J., Walbridge, S., Haas, C., & Saari, R. (2017). Understanding the total life cycle cost implications of reusing structural steel. **Environment Systems and Decisions**, 37(1), 101–120. <https://doi.org/10.1007/s10669-016-9621-6>

Zygomalas, I., & Baniotopoulos, C. (2016). Environmental impact assessment of end-of-life scenarios for steel buildings. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 20(3), 301–313. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1036125>

Apêndice A

Figura A- 1: Mapa de Processos, IDM.



Apêndice B

Tabela B- 1: Relação entre os materiais atribuídos no Revit com os materiais no Tally.

Material Revit	Especificação do material no Tally
Estrutura	
Aço, 45-345, New	Steel, W section (wide flange shape), Hot rolled structural steel, AISC - EPD Service Life: Default to building life Existing or salvaged material: No Density: 100 % by vol. Fireproofing: None, Finish: None
Aço, 45-345, Old	Steel, W section (wide flange shape), Hot rolled structural steel, AISC - EPD Service Life: Default to building life Existing or salvaged material: Yes Density: 100 % by vol. Fireproofing: None, Finish: None
Concreto, 35 MPa Moldado in loco	Cast-in-place concrete structural concrete, 5001-6000 psi 0-19% fly ash and/or slag Service life: Default to building life Existing or salvaged material: No Density: 100 % by vol. Reinforcement: Column or beam, moderate reinforcement
Parede e Piso	
Argamassa	Mortar Type N Service life: 60 years Existing or salvage material: No Density: 100 % by vol.
Porcelanato 60 x 60	Porcelain ceramic tile, glazed Service life: Default (60 years) Existing or salvage material: No Porcelain flooring tile thickness: 10mm
Pintura Branca	Paint, interior acrylic latex Service life: Default (7 years) Existing or salvage material: No Latex interior paint coverage rate: 2 coats plus primer
Tijolo, Comum	Brick, generic Service life: Default (150 years) Existing or salvage material: No Brick volume: 10mm joint Mortar type N, Brick joint size: 10mm joint
Granito 45 x 90	Stone tile, Granite tile Service life: Default (60 years) Existing or salvage material: No Porcelain flooring tile thickness: 10mm
Concreto, 35 MPa Moldado in loco	Cast-in-place concrete, structural concrete, 5001-6000 psi 0-19% fly ash and/or slag Service life: Default to building life Existing or salvaged material: No Density: 100 % by vol. Reinforcement: Slab, moderate reinforcement

Material Revit	ICE DATABASE				
	Material ICE	Energia Incorporada (MJ/kg)	Carbono Incorporado (kgCO2/kg)	Carbono Incorporado (kgCO2e/kg)	Massa específica (kg/m³)
Estrutura					
Aço, 45-345, New	Steel, Engineering steel - UK (EU)	13,10	0,68	0,72	7850
Aço, 45-345, Old	None	0,00	0,00	0,00	7850
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	Concrete, General, 32/40MPa	1,03	0,15	0,16	2500
	Reinforced Concrete (100kg per m³ concrete)	1,04	0,07	0,08	150
Parede					
Argamassa	Mortar (1:4)	1,11	0,17	0,18	1500
Porcelanato 60 x 60	Ceramics, Tiles and Cladding Panel	12,00	0,74	0,78	1900
Pintura Branca	Paint, General	70,00	2,42	2,91	1500
Tijolo, Comum	Bricks, General	3,00	0,23	0,24	2080
Piso					
Argamassa	Mortar (1:4)	1,11	0,17	0,18	1500
Granito 45 x 90	Granite	11,00	0,64	0,70	2880
Porcelanato cinza 90 x 90	Ceramics, Tiles and Cladding Panel	12,00	0,74	0,78	1800
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	Concrete, General, 32/40MPa	1,03	0,15	0,16	2500
	Reinforced Concrete (100kg per m³ concrete)	1,04	0,07	0,08	70

Material Revit	Cenário 00			Cenário 01		
	Energia Incorporada (MJ)	Carbono Incorporado (kgCO2)	Carbono Incorporado (kgCO2eq)	Energia Incorporada (MJ)	Carbono Incorporado (kgCO2)	Carbono Incorporado (kgCO2eq)
Estrutura						
Aço, 45-345, New	422.651,85	21.939,18	23.229,72	754.808,90	39.180,92	41.485,68
Aço, 45-345, Old	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	97.360,75	14.462,33	15.407,58	24.874,50	3.694,95	3.936,45
	147.459,00	10.208,70	10.917,64	37.674,00	2.608,20	2.789,33
Parede						
Argamassa	32.917,05	5.071,01	5.397,21	32917,05	5071,005	5397,21
Porcelanato 60 x 60	206.796,00	12.752,42	13.441,74	206796	12752,42	13441,74
Pintura Branca	112.350,00	3.884,10	4.670,55	112350	3884,1	4670,55
Tijolo, Comum	381.139,20	29.220,67	30.491,14	381139,2	29220,672	30491,136
Piso						
Argamassa	40.143,15	6.184,22	6.582,03	40143,15	6184,215	6582,03
Granito 45 x 90	65.894,40	3.833,86	4.193,28	65894,4	3833,856	4193,28
Porcelanato cinza 90 x 90	215.352,00	13.280,04	13.997,88	215352	13280,04	13997,88
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	438.213,50	65.093,85	69.348,35	438213,5	65093,85	69348,35
	309.727,60	21.442,68	22.931,76	309727,6	21442,68	22931,755
Totais:	2.470.004,50	207.373,04	220.608,86	2.619.890,30	206.246,91	219.265,39

Tabela B-3: Cálculos da ACV dos cenários 00 e 01 utilizando o banco de dados do ICE.

Material Revit	Cenário 02			Cenário 03		
	Energia Incorporada (MJ)	Carbono Incorporado (kgCO2)	Carbono Incorporado (kgCO2eq)	Energia Incorporada (MJ)	Carbono Incorporado (kgCO2)	Carbono Incorporado (kgCO2eq)
Estrutura						
Aço, 45-345, New	397.971,45	20.658,06	21.873,24	0,00	0,00	0,00
Aço, 45-345, Old	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	24.874,50	3.694,95	3.936,45	24.874,50	3.694,95	3.936,45
	37.674,00	2.608,20	2.789,33	37.674,00	2.608,20	2.789,33
Parede						
Argamassa	32917,05	5071,005	5397,21	32917,05	5071,005	5397,21
Porcelanato 60 x 60	206796	12752,42	13441,74	206796	12752,42	13441,74
Pintura Branca	112350	3884,1	4670,55	112350	3884,1	4670,55
Tijolo, Comum	381139,2	29220,672	30491,136	381139,2	29220,672	30491,136
Piso						
Argamassa	40143,15	6184,215	6582,03	40143,15	6184,215	6582,03
Granito 45 x 90	65894,4	3833,856	4193,28	65894,4	3833,856	4193,28
Porcelanato cinza 90 x 90	215352	13280,04	13997,88	215352	13280,04	13997,88
Concreto, 35 MPa, Moldado in loco	438213,5	65093,85	69348,35	438213,5	65093,85	69348,35
	309727,6	21442,68	22931,755	309727,6	21442,68	22931,755
Totais:	2.263.052,85	187.724,05	199.652,95	1.865.081,40	167.065,99	177.779,71

Tabela B-4: Cálculos da ACV dos cenários 02 e 03 utilizando o banco de dados do ICÉ.