



**AUTOMAÇÃO DA ESTIMATIVA DE CUSTO DE EXECUÇÃO DE  
INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA UTILIZANDO O BIM**

**TALITA EVELYN PAULINO DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AUTOMAÇÃO DA ESTIMATIVA DE CUSTO DE EXECUÇÃO DE  
INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA UTILIZANDO O BIM**

TALITA EVELYN PAULINO DA SILVA

ORIENTADOR: DSc. MICHELE TEREZA MARQUES CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**BRASÍLIA/DF – JUNHO/2024**  
TALITA EVELYN PAULINO DA SILVA

AUTOMAÇÃO DA ESTIMATIVA DE CUSTO DE EXECUÇÃO DE INFRAESTRUTURA  
FERROVIÁRIA UTILIZANDO O BIM

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE  
DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO POR:

---

Prof.º Michele Tereza Marques Carvalho, DSc. (ENC-UnB)  
(Orientador)

---

Prof.º Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva, PhD. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Prof.º Fernanda Fernandes Marchiori, PhD. (ENC-UFSC)  
(Examinador Externo)

Brasília/DF  
Junho/2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, TALITA EVELYN PAULINO DA.

Automação da estimativa de custo de execução de infraestrutura ferroviária utilizando o BIM.  
[Distrito Federal] 2024.

XXIV, 86 p., 210x297 mm (ENC/FT/UNB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2024).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- |                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| 1. Automação           | 3. BIM                       |
| 2. Estimativa de custo | 4. Projeto de infraestrutura |
| I. ENC/FT/UNB          | II. Título (série)           |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, T.E.P. Automação da estimativa de custo de execução de infraestrutura ferroviária utilizando o BIM. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 86p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Talita Evelyn Paulino da Silva

TÍTULO: Automação da estimativa de custo de execução de infraestrutura ferroviária utilizando o BIM.

GRAU: Mestre ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Talita Evelyn Paulino da Silva  
Qr 320 conjunto 12 casa 01  
Samambaia – Brasília-DF.  
e-mail: talitaevelyn@hotmail.com

*A Deus e minha família. A vocês sou eternamente grata.*

*Amo vocês!*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de realização dessa pesquisa e por toda força, sabedoria e providência divina para vencer os desafios diários. Sem Ele nada seria possível!

Ao meu pai e meus irmãos, pelo incentivo, conselhos, apoio, paciência, compreensão dos momentos ausentes para estudar e por ter ido comigo em um Congresso Latinoamericano, na República Dominicana. À minha afilhada, amor da minha vida, que me proporcionou muitas alegrias e distrações. Ao meu marido pelo suporte em todos os momentos, conselhos, companheirismo e por ter estudado comigo. À família do meu marido pela torcida e apoio.

Agradeço também à Professora Michele Tereza, pelas orientações indispensáveis, várias revisões e por todos os ensinamentos, e a todos os professores do PECC.

Aos meus amigos, engenheiros de infraestrutura, que proporcionaram apoio, suporte e troca de ideias desse estudo, obrigada pela paciência, conhecimento, torcida e confiança, durante todo o processo.

Aos meus amigos, que trabalhamos com obras de arte especiais, obrigada pelo auxílio, ensinamentos, conselhos e torcida, desde o início desse sonho.

Aos meus amigos de trabalho, pelo incentivo, apoio, ensinamentos, conselhos e pela ajuda em equilibrar os compromissos, para tornar dias mais leves.

Aos meus amigos do PECC, obrigada pelo apoio nos momentos difíceis, troca de conhecimentos e torcida.

Aos meus amigos da vida, pela motivação, alegrias e paciência com os meus horários.

Aos entrevistados. Muito obrigada pela disponibilidade, confiança e troca de informações para agregar conhecimentos.

## RESUMO

### **AUTOMAÇÃO DA ESTIMATIVA DE CUSTO DE EXECUÇÃO DE INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA UTILIZANDO O BIM**

Autor: Talita Evelyn Paulino da Silva

Orientador: Michele Tereza Marques Carvalho

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 25 de junho de 2024

A integração de linguagens de programação e o *Building Information Modeling* (BIM) é fundamental na facilitação do compartilhamento detalhado de informações em projetos de infraestrutura. No entanto, é essencial que as informações utilizadas para estimar os custos dos projetos de infraestrutura tenha maior acurácia, confiabilidade de dados e menor discrepâncias nos dados do projeto, contribuindo assim para uma tomada de decisão mais embasada. O objetivo desta pesquisa é desenvolver um fluxo automatizado para quantificação de execução dos serviços de terraplenagem e para aplicação da estimativa de custos de projeto ferroviário em BIM, além de validar por meio de estudo de caso e entrevistas com profissionais da área de conhecimento. Para isso, utilizou-se o Dynamo da Autodesk Civil 3D para elaborar *scripts* e automatizar a extração e implementação de informações necessárias à distribuição de terraplenagem e à estimativa de custo na propriedade do modelo. Nos resultados, obteve-se 3 planilhas de um *script*. Uma delas com dados de estaca, corte, aterro, cota de projeto, cota de terreno, cota vermelha, áreas e volumes. Já a outra planilha é uma matriz de distância entre corte e aterro, e a última é para realizar a distribuição de terra. Assim, obteve-se a quantificação dos serviços de terraplenagem, por um processo manual de análise do projetista. Esse processo foi validado, pois a estimativa de custo foi apresentada no arquivo IFC do corredor do modelo. Além disso, projetistas experientes ratificaram e reforçaram ainda mais a eficácia qualitativa dessa metodologia. Este estudo contribui cientificamente para uma melhor compreensão e desenvolvimentos de processos de fluxos automatizados de informações para estimativas de custos de projetos de infraestrutura em BIM. Destaca-se que, até o momento, na literatura científica não foram encontrados trabalhos com a mesma metodologia.

**Palavras-chaves:** Automação, BIM, estimativa de custo, projeto de infraestrutura, terraplenagem

## **ABSTRACT**

### **AUTOMATION OF COST ESTIMATION FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE EXECUTION USING BIM**

Autor: Talita Evelyn Paulino da Silva

Orientador: Michele Tereza Marques Carvalho

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Jun 25<sup>nd</sup> of 2024

The integration of programming languages and Building Information Modeling (BIM) is crucial in facilitating the detailed sharing of information in infrastructure projects. However, the information used to estimate the costs of infrastructure projects must have greater accuracy, data reliability, and fewer discrepancies in project data, thus contributing to more informed decision-making. The aim of this research is to develop an automated information flow for the quantification of earthmoving services and for the application of cost estimation in railway projects using BIM, in addition to validating it through a case study and interviews with professionals in the field. To this end, Autodesk Civil 3D's Dynamo was used to create scripts and automate the extraction and implementation of information necessary for earthmoving distribution and cost estimation in the model's property. The results yielded three spreadsheets from a script. One of them contains data on stakes, cuts, fills, project levels, terrain levels, red levels, areas, and volumes. Another spreadsheet is a distance matrix between cuts and fills, and the last one is for performing the distribution of soil. Thus, the designer obtained the quantification of earthmoving services through a manual analysis process. This process has been validated as the cost estimation was presented in the model's corridor IFC file. Furthermore, experienced designers confirmed and further reinforced the qualitative effectiveness of this methodology. This study scientifically contributes to a better understanding and development of automated information flow processes for cost estimation of infrastructure projects in BIM. It is noteworthy that, to date, no studies with the same methodology have been found in the scientific literature.

**Key words:** Automation, BIM, cost estimation, infrastructure project, earthwork

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Diagrama de massas (Adaptado de MENESES FILHO, 2016).....	23
Figura 2 – Métodos de estimativa de custo (BARROS, 2019) .....	27
Figura 3 – Métodos de estimativa de custos por cada modo de transporte (Adaptado de BARAKCHI; TORP; BELAY, 2017).....	28
Figura 4 – Métodos de estimativa de custos nos anos de 2002 a 2015 (Adaptado de BARAKCHI; TORP; BELAY, 2017).....	29
Figura 5 – Evolução dos sistemas de custos do DNER e DNIT (Adaptado de DNIT, 2017)..	31
Figura 6 – Fluxograma do Mapeamento Sistemático da Literatura .....	35
Figura 7 – Metodologia <i>Design Science Reserch</i> (Adaptado de WIERINGA, 2009) .....	36
Figura 8 – Etapas da metodologia de estudo.....	38
Figura 9 – Fluxograma de resultados do <i>script 1</i> e <i>script 2</i> .....	38
Figura 10 – Localização de implantação de ferrovia .....	39
Figura 11 – Entradas de informações no <i>script 1</i> .....	41
Figura 12 – Fluxograma para distribuição de terra de corte para aterro .....	43
Figura 13 – Composição analítica de custo do serviço de escavação, carga e transporte em material de 1ª categoria com DMT de 50 metros.....	44
Figura 14 – Configuração de propriedades atribuídas para o corredor .....	45
Figura 15 – Entradas de informações no <i>script 2</i> .....	45
Figura 16 – Quantitativo de publicações por ano.....	48
Figura 17 – Mapa de coocorrência de todas as palavras-chaves.....	49
Figura 18 – Fluxograma do <i>script 1</i> para obtenção das informações para distribuição de terraplenagem.....	51
Figura 19 – Bloco do código para extração de áreas e volumes do projeto.....	52
Figura 20 – Criação de arquivo .....	53
Figura 21 – Volume de terraplenagem.....	53
Figura 22 – Distâncias de corte para aterro.....	53

Figura 23 – Distribuição de terraplenagem .....	54
Figura 24 – Fluxograma do <i>script 2</i> para aplicação da estimativa de custo.....	60
Figura 25 – Principais nós de entrada do <i>script 2</i> .....	61
Figura 26 – Nó <i>Code Block</i> , do <i>script 2</i> , com os nomes das propriedades .....	61
Figura 27 – Principais nós de saída do <i>script 2</i> .....	62
Figura 28 – Propriedades de estimativa de custo preenchidas automaticamente no corredor .	63
Figura 29 – Arquivo IFC no Open IFC Viewer com as propriedades da estimativa de custo .	63
Figura 30 – FCInfraExportPropertyMapping com a propriedade do corredor .....	64
Figura 31 – IFC com o custo estimado dos serviços de distribuição de terra .....	64
Figura 32 – Herança de entidade do IFCFacilityPartCommon (Adaptado de BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED, 2024).....	65
Figura 33 – Estrutura IFC com a entidade IfcRoadPart .....	67
Figura 34 – IfcRoadPart com a propriedade da estimativa de custo dos serviços de distribuição de terraplenagem .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volume de terraplenagem .....	54
Tabela 2 – Matriz de distância entre corte e aterro .....	55
Tabela 3 – Distribuição de terra com origem para destino, com compilação de dados .....	56
Tabela 4 – Distribuição de terra com origem para destino, com compilação de dados .....	56
Tabela 5 – Base de dados de estimativa de custo.....	57
Tabela 6 – Definição de cada herança de entidade .....	65
Tabela 7 – Quantidade de avaliações por nível e as respectivas médias dos resultados das perguntas das entrevistas .....	69

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

### Abreviações

5D	5ª Dimensão do <i>Building Information Modeling</i>
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AT	Aterro
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BriM	Modelagem de Informações de Pontes
CEF	Caixa Econômica Federal
CO	Corte
CPU	Composições de Preços Unitários
DMT	Distância Média de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Design Science Research</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
I-BIM	Formato de dados abertos no <i>Building Information Modeling</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
LOD	<i>Levels of Developments</i>
MSL	Mapeamento Sistemático da Literatura
MVD	<i>Model View Definition</i>
PP	Ponto de passagem
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
VPL	<i>Visual Programming Language</i>

## **Símbolos**

$\mu$	Média
$n$	Número da artigos selecionados
$x$	Número da estaca
$V$	Volume

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
1.3	LIMITAÇÕES .....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
2.1	PROJETO DE INFRAESTRUTURA DE FERROVIÁRIO EM BIM .....	21
2.1.1	Terraplenagem.....	22
2.1.2	Arquivo IFC .....	24
2.2	ESTIMATIVA DE CUSTO .....	26
2.2.1	Estimativa de custo para projetos de infraestrutura .....	27
2.2.2	Legislação.....	29
2.2.3	Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO).....	30
2.3	AUTOMATIZAÇÃO DE DADOS .....	32
2.3.1	Linguagem de programação visual .....	32
2.3.2	Ontologia na integração de dados .....	33
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA.....</b>	<b>35</b>
3.1	MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA.....	35
3.2	ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA .....	36
3.3	ESTUDO DE CASO .....	39
3.4	<i>SCRIPT</i> 1 .....	40
3.5	DISTRIBUIÇÃO DE TERRA.....	42
3.6	BASE DE DADOS DE ESTIMATIVA DE CUSTO.....	43
3.7	CONFIGURAÇÃO DE PROPRIEDADE.....	44
3.8	<i>SCRIPT</i> 2 .....	45
3.9	IFC PARA VALIDAÇÃO.....	46
3.10	ENTREVISTAS PARA VALIDAÇÃO .....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>48</b>
4.1	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	48
4.2	VALIDAÇÃO POR MEIO DO ESTUDO DE CASO.....	50

4.2.1	<i>Script 1</i> .....	50
4.2.2	Quantificação para serviços de estimativa de custos .....	54
4.2.3	Automação de estimativa de custos .....	60
4.2.4	Software de orçamentação .....	67
4.3	VALIDAÇÃO POR MEIO DE ENTREVISTAS .....	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>71</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	71
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – SCRIPT 1</b> .....	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE B – SCRIPT 2</b> .....	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE C – FORMULÁRIO DE ENTREVISTA</b> .....	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE D – RESULTADO DO SCRIPT 1</b> .....	<b>86</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura é um setor fundamental para progredir e expandir o desenvolvimento socioeconômico de uma região. Em vista que os projetos de construção estão ficando mais complicados e complexos (AL-AIDROUS *et al.*, 2022), a maioria dos projetos de modernização para o desenvolvimento de novas capacidades em infraestrutura ferroviária e rodoviária possuem medidas restritivas de projeto e de execução de obra que geram ou diminuem custos (RAICU *et al.*, 2019).

É de suma importância otimizar o planejamento para a execução de empreendimentos que envolvam obras de construção de maneira eficiente para minimizar custos (LI; ROBERTI, 2017). A escolha de um método de entrega para o projeto de infraestrutura é uma das decisões mais importantes enfrentadas pelos governos (MESHREF; ELKASABY; WAGEH, 2020).

A estimativa de custo é um procedimento para determinar o escopo do trabalho e os recursos financeiros necessários para atender os requisitos do projeto (HATAMLEH *et al.*, 2018). A falta de análise detalhada com qualidade pode resultar em erros graves com impacto significativo nos custos e na duração do projeto (HÄUßLER; BORRMANN, 2020).

A indústria da construção promove e desenvolve tecnologias modernas e eficientes para projetos de construção cada vez mais complexos. O *Building Information Modeling* (BIM) tem uma influência positiva no andamento de um projeto em termos de custos, tempo, comunicação, coordenação e qualidade. Com a ajuda dessa metodologia, os erros e suas origens de um projeto podem ser detectados mais cedo e com mais eficiência (HÄUßLER; BORRMANN, 2020).

Alguns fatores podem afetar a precisão da estimativa de custo de projetos de construção, como experiência em precificar serviços, compreensão da importância da estimativa, desenhos e especificações concisos, disponibilidade de banco de dados de propostas em projetos semelhantes, nível de concorrência, tempo para preparar estimativas de custo, complexidade do projeto, precisão e confiabilidade das informações de custo, entre outros (HATAMLEH *et al.*, 2018).

Akanbi e Zhang (2021) e Zhang e El-Gohary (2016) realizaram pesquisas e adquiriram resultados positivos sobre precisão de estimativas de custos de construção para melhorar e automatizar o processo manual, que é demorado e sujeito a erros envolvidos na estimativa de custos. Cabe informar que executar apenas verificações básicas não explora todo o potencial da garantia de qualidade automatizada (HÄUßLER; BORRMANN, 2020).

A estimativa de custo requer dados de engenharia abrangentes, um processo de precificação detalhado e demorado (TONG; GUO; FANG, 2021). As plataformas de estimativa de custos utilizadas na indústria têm utilizado o BIM para reduzir o esforço manual e o tempo envolvido na geração de levantamentos de quantitativos precisos (AKANBI; ZHANG, 2021). As informações extraídas do BIM nos diferentes *Levels of Developments* (LOD) são usadas para gerar diferentes tipos de estimativas (AKANBI; ZHANG, 2021).

O *Industry Foundation Classes* (IFC) é um formato de dados que visa permitir a troca de modelos de informações a fim de executar funções lógicas e análise espacial. O modelo de dados IFC é caracterizado pela hierarquia que define relacionamentos e atributos que podem ser herdados de entidades. Nesse sentido, o esquema de dados do IFC é estruturado em camadas que inclui algumas definições de recursos, isto é, materiais, custos, aprovações, restrições, entre outros (MARMO *et al.*, 2020). Sendo assim, o IFC é útil para precisão de estimativa de custo de projetos de infraestrutura.

O desenvolvimento de um modelo de estimativa de custo é um dos focos no campo de estudos de previsão de custo de engenharia rodoviária. Para isso, indica-se a identificação do direcionador de custo e modelagem de inteligência computacional (TONG; GUO; FANG, 2021).

A *Visual Programming Language* (VPL) é usada para automatizar as trocas de informações entre sistemas de informações das instalações e modelos BIM (MARMO *et al.*, 2020). O software Dynamo utiliza o ambiente VPL e fornece um espaço de trabalho básico, no qual as funções podem ser organizadas e vinculadas umas às outras.

Desse modo, as ferramentas disponíveis na tecnologia podem ser usadas para automatizar informações, minimizando o tempo necessário para que os engenheiros se envolvam no processo de medição (LEE *et al.*, 2015).

## **1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO**

A automação por meio de programação é um dos métodos para alcançar precisões de dados. Para saber se isso é relevante, foi realizado um Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL), na qual permite estudar o estado da arte por meio de análise detalhada de estudos publicações de artigos, relevantes dos anos de 2013 a 2023, em base de dados consolidada e com qualidade reconhecida mundialmente. Assim foi possível realizar a identificação dos problemas de relevância com potencial de pesquisa, por meio do MSL.

Para ter um fluxo automatizado de informações em BIM, é necessário ter o conhecimento dessa modelagem. A norma ISO 19650 (2018) apresenta recomendações para o gerenciamento de informações de projetos e ativos, incluindo troca, gravação, versão e organização e o Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020, estabelece a utilização do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal.

Um engenheiro implementa a estimativa com base no julgamento subjetivo, podem ocorrer erros humanos que diminuem a consistência dos resultados e, portanto, reduzem a confiabilidade (LEE; KIM; YU, 2015). A estimativa de custos é um dos processos preparatórios mais críticos em qualquer projeto de construção. Um custo inicial alto pode deprimir um cliente satisfeito com o projeto. Alternativamente, uma estimativa de custo muito baixa pode levar a problemas financeiros em um estágio posterior (FERRONATO, 2020).

Em vista disso, um projeto desenvolvido em BIM permite níveis elevados de compartilhamento de detalhes de informações de projetos. A automação dessas informações é um meio que exclui a verificação de dados manuais e por isso, alcança a precisão de dados. Dessa maneira, o fluxo automatizado por meio de linguagem de programação pode ser utilizado para realizar a estimativa de custo de um projeto de infraestrutura em BIM, de maneira que seja útil em qualquer projeto de infraestrutura.

Ressalta-se que a terraplenagem é um pontos importantes dos projetos de infraestrutura e que impacta no custo na obra. Segundo Falcão, Nobre Júnior e Prata (2020), embora existam muitos estudos focados na otimização matemática entre zonas de corte e aterro, poucos apresentam aplicabilidade em projetos reais.

Nesse sentido, nos projetos de infraestrutura de transportes possuem atividades que demandam tempo e grande impacto nos custos. A análise de terraplenagem é realizada em todo trecho ferroviário e nos projetos de infraestrutura. Assim, são atividades que se repetem e que necessitam de precisão de informações, ou seja, necessitam da aplicação de fluxo automatizado.

## **1.2 OBJETIVOS**

Esta pesquisa tem como objetivo geral de propor a automação de fluxo para elaboração de estimativa de custo de projeto de infraestrutura ferroviária, com a utilização do BIM.

Os objetivos específicos indicados para atingir os objetivos gerais, com o desenvolvimento desta pesquisa, são:

- Realizar um Mapeamento Sistemática da Literatura sobre projetos de infraestrutura e automatização em BIM de estimativa de custo;
- Desenvolver um fluxo automatizado para quantificação de execução dos serviços de terraplenagem;
- Elaborar um fluxo automatizado para aplicação da estimativa de custos de terraplenagem no corredor de um trecho de projeto ferroviário em BIM;
- Validar *scripts* de automatização por meio de estudo de caso e entrevistas com profissionais da área de infraestrutura.

### **1.3 LIMITAÇÕES**

A metodologia BIM é mais desenvolvida para arquiteturas verticais e para o setor de infraestruturas como estradas, ferrovias, pistas de aeroportos, barragens e pontes têm uma caracterização e extensão lineares que é muito complicado seguir os mesmos esquemas e princípios do BIM para construção civil.

Nessa pesquisa não considerou os requisitos da geotecnia na distribuição de terra e foi estudado o modo de demanda e oferta, mas apenas de corte para aterro de solo de 1ª categoria. Além disso, o projeto de estudo de caso apresentou um tamanho grande, o que impediu a abrir o modelo no Blender BIM e apresentou demora para abrir o arquivo nos softwares.

Nesse estudo não foi adotado um sistema de classificação da terminologia e estrutura nas siglas dos termos utilizados nos fluxos automatizados, o que não impossibilitou de obter os dados dos resultados.

Por fim, destaca-se que devido o IFC 4x3 ser a versão mais recente, houve dificuldades de informações disponíveis na literatura e nas diretrizes da Autodesk para exportar o projeto de infraestrutura no Civil 3D. Em vista disso, a maioria dos entrevistados experientes não sabiam e perguntaram como exportar o arquivo utilizando o IFC 4x3.

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Essa dissertação divide-se em cinco capítulos. Primeiramente, uma introdução geral é apresentada com a temática dos estudos sobre automação da estimativa de custo de projetos de infraestrutura em BIM e a justificativa e motivação do tema escolhido para este trabalho. As justificativas e motivação sustentam a pesquisa e a relevância do tema, para então, traçar os

objetivos gerais e específicos a serem obtidos. Além disso, são abordadas as limitações que foram identificadas durante a pesquisa.

No segundo capítulo, aborda-se a revisão bibliográfica utilizada como referência nesse trabalho. Nesta, introduz-se inicialmente sobre os projetos de infraestrutura ferroviária em BIM, concentrando-se na terraplenagem e IFC. Em seguida, informa-se sobre a estimativa de custo do SICRO. Ademais, apresenta-se a automação de dados com auxílio da linguagem de programação visual e ontologia de integração de dados.

No terceiro capítulo aponta-se a metodologia da pesquisa pelo Mapeamento Sistemático da Literatura e estudo de caso. Nessa fase, relata-se o desenvolvimento do estudo com o *script 1*, distribuição de terra, base de dados de estimativa de custo, configuração de propriedade do modelo, *script 2*, validação por meio do IFC e entrevistas com profissionais.

Considerando o quarto capítulo em sequência, neste são apresentados e discutidos todos os resultados para validação pelos dois métodos, no estudo de caso e pelos profissionais de infraestrutura de transportes.

No quinto e último capítulo, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são relatadas. E, por último, é apresentada toda a bibliografia dos trabalhos que embasam esta dissertação.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

Neste capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre projetos de infraestrutura em BIM, abordando sobre os aspectos de terraplenagem e IFC. Em seguida, são discutidos os princípios básicos de estimativa de custo de projetos de infraestrutura com a utilização do SICRO. Por fim, verifica-se os fundamentos de automação com linguagem de programação e ontologia.

### **2.1 PROJETO DE INFRAESTRUTURA DE FERROVIÁRIO EM BIM**

O transporte é o principal componente dos sistemas logísticos das empresas, sendo que elas devem escolher o modo mais adequado. Entre as opções para o transporte de carga, são cinco os principais modais disponíveis: ferroviário, rodoviário, aquaviário, dutoviário e aéreo (COSTA, 2016). O histórico ferroviário brasileiro está à luz de suas constantes interações com o governo federal, desde o surgimento no Império, até os dias atuais (FELIX, 2018).

O interesse político pelas ferrovias é impulsionado por diversos fatores. O transporte ferroviário é o mais adequado para o escoamento de grandes volumes de produção em longas distância. A ferrovia de carga permite maior segurança de transporte e menor risco de acidentes com os grandes quantidades e pesos de bens transportados (MURAMATSU *et al.*, 2019).

O Plano Nacional de Logística 2035 apresenta cenários futuros que indicam necessidades e oportunidades para a infraestrutura de transportes que possam trazer melhoria de serviços, aumento da eficiência do transporte de cargas do país e redução de custos. No ano de 2017 o Brasil apresentou 21.286 km de ferrovia e o cenário mais otimizado para 2035 é ter 40.562 km (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2022), sendo assim, representa um planejamento futuro para ter aproximadamente o dobro do quantitativo de extensão de infraestrutura ferroviária existente.

Os estudos e projetos de obras de infraestrutura ferroviária destacados no Brasil atualmente são Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), Ferrovia Transcontinental e Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO), Corredor Ferroviário de Santa Catarina, Ferrovia do Pantanal e Ramais da Ferrovia Norte Sul (FNS) (INFRA S.A., 2024).

O caráter multidisciplinar conferido ao projeto ferroviário exige uma constante interação entre as disciplinas percorridas com a imersão dos profissionais envolvidos (ANTT, 2019). Segundo a INFRA S.A. (2023), que dispõe o Manual BIM de Projetos Ferroviários, as disciplinas necessárias para a elaboração dos projetos ferroviários em todas as fases integrantes do ciclo do projeto são: estudos topográficos, estudos geológicos, estudos geotécnico/geotécnica,

geometria do traçado, estudos operacionais, estudos hidrológicos, desapropriação, terraplenagem, obras de arte especiais, túneis, superestrutura, sinalização, drenagem, obras de arte corrente, obras complementares e orçamento da obra.

Sabe-se que o BIM é uma metodologia de gerenciamento de informações usada para projetar, integrar, gerenciar e visualizar o processo de construção ao longo do ciclo de vida de um projeto (SHARAFAT *et al.*, 2021). A utilização plena e funcional dessa metodologia exige o cumprimento dos requisitos mínimos para as diversas fases de desenvolvimento do projeto, que visam garantir a integridade de todo o projeto, e não apenas dos seus resultados, através da implementação de medidas e protocolos rigorosamente documentado em publicações do projeto (INFRA S.A., 2023).

### **2.1.1 Terraplenagem**

O projeto de terraplenagem compreende o detalhamento de seções transversais em cortes e aterros, além da determinação e distribuição dos volumes destinados à conformação da plataforma da ferrovia. Ressalta-se, ainda, que o projeto de terraplenagem pode ocasionar alterações no desenho geométrico. Portanto, somente pode-se considerar a geometria concluída após a elaboração do projeto de terraplenagem (ANTT, 2019).

Um projeto de infraestrutura de transportes possui quatro etapas que são definidoras para os custos da terraplenagem: o alinhamento horizontal, o alinhamento vertical, a definição da seção transversal e a alocação de massas. A determinação dos alinhamentos, bem como dos volumes de corte e aterro gerados para cada solução proposta, geram tarefas intensivas em mão de obra para os projetistas e, portanto, mais horas de trabalho (SILVA, 2021).

Reitera-se que em um projeto executivo determina-se dos volumes da movimentação de material escavado, plantas dos locais de empréstimo e bota-foras, além da elaboração do diagrama de massas (Figura 1), conhecido como diagrama de Bruckner (ANTT, 2019). A alocação de massas representa a definição e identificação da origem e o destino dos solos provenientes das atividades de terraplenagem, descrevendo os volumes, classificações e as Distâncias Médias de Transporte (DMT).

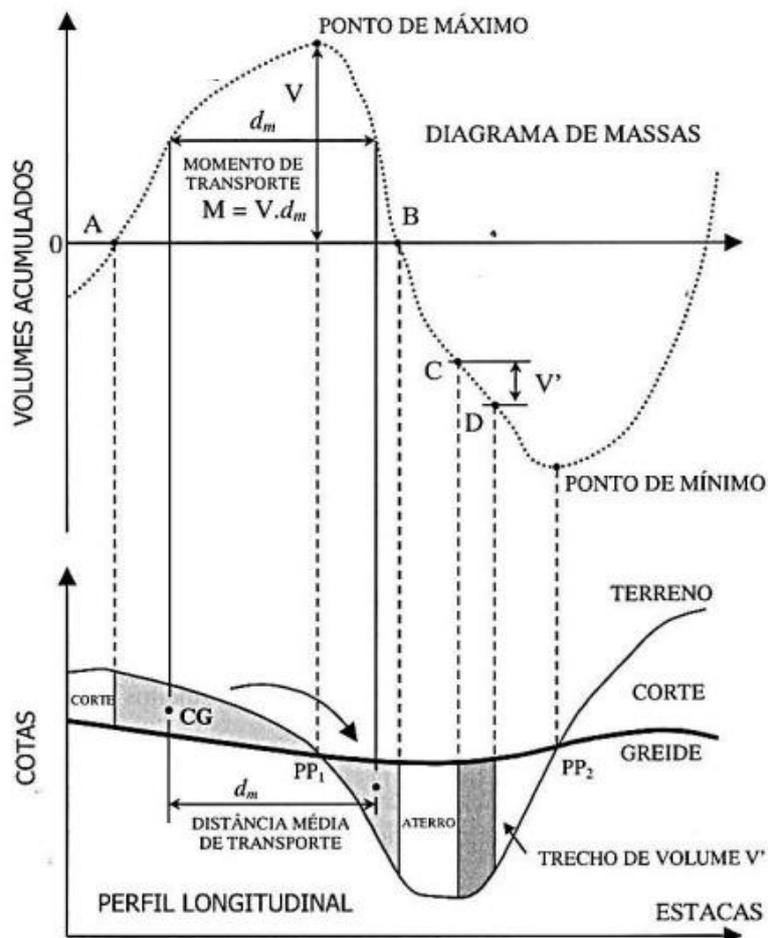


Figura 1– Diagrama de massas (Adaptado de MENESES FILHO, 2016)

O diagrama de massas ainda é a principal ferramenta para o planejamento das atividades da terraplenagem, mas ao ser comparado com às técnicas de otimização pode ser considerado ineficiente devido ao tempo gasto na sua confecção. O que é necessário, porém, é que essas técnicas de otimização sejam construídas de tal forma que possam ser usadas no dia a dia do engenheiro tomador de decisão (FALCÃO, 2016).

Para auxiliar o planejamento de terraplenagem, o software Civil 3D dispõe aos projetistas a elaboração da distribuição de terra como uma ferramenta para relacionar o volume de terra movimentado, por cortes e aterros, acumulado ao longo do estaqueamento, porém sem considerar todos os requisitos de projeto. A Norma DNIT 108-ES (2009) define aterros sendo trechos de rodovia que requer implantação de depósito de materiais provenientes de cortes e/ou de empréstimos no interior dos limites das seções de projeto (*off sets*) que definem o corpo estradal. Já o corte requer a escavação do terreno natural, ao longo do eixo e no interior dos limites dos *off sets* (NORMA DNIT 106-ES, 2009).

A movimentação de material depende dos requisitos da geotécnica. De acordo com a norma Norma DNIT 106-ES (2009), materiais podem ser classificados em solos de 1ª, 2ª e 3ª categoria. Destaca-se que essa norma descreve o seguinte significado da 1ª categoria:

“Compreendem os solos em geral, de natureza residual ou sedimentar e seixos rolados ou não com diâmetro máximo de 0,15 cm. Em geral todos os materiais são escavados por tratores escavo-transportadores de pneus, empurrados por tratores esteiras de peso compatível ou por escavadeiras hidráulicas. Sua escavação não exige o emprego de explosivo.”

Os solos de 2ª categoria são materiais granulares formados geralmente por fragmentos de rocha alterada ou fraturada e materiais de 3ª categoria compreendem a rocha sã, matacões maciços, blocos e rochas fraturadas, exigindo o uso contínuo de explosivos, ou outros materiais e dispositivos para desagregação da rocha (NORMA DNIT 106-ES, 2009).

Para distribuição de terraplenagem é considerado o fator de homogeneização. Este tem o objetivo de ter o volume de corte necessário à confecção de um determinado aterro (PEREIRA *et al.*, 2015). Por exemplo, um material com fator de homogeneização 1,5 indica que, para produzir 1 m<sup>3</sup> de aterro, são necessários 1,5 m<sup>3</sup> de material natural do corte (RUIZ-PADILLO *et al.*, 2023).

Portanto, cada etapa do projeto deve ser minuciosamente planejada e especificada, pois os projetos executivos requerem detalhamentos e assertividades para desenvolver as obras de acordo com a listagem definida dos serviços de terraplenagem.

### **2.1.2 Arquivo IFC**

O *Industry Foundation Classes* (IFC) é um padrão internacional BIM aberto para troca e compartilhamento de informações entre os participantes multidisciplinares do projeto (SOILÁN *et al.*, 2021). O esquema IFC é um modelo de dados padronizado que codifica, de forma lógica, a semântica, atributos, relacionamentos, propriedades, quantidades, objetos, conceitos abstratos, processos e pessoas. Cabe destacar que o modelo de dados IFC é caracterizado pela hierarquia de herança que define relacionamentos e atributos que podem ser herdados de entidades.

Os arquivos IFC podem ser codificados em diferentes formatos, como .xml, .json e .step. O IFC fornece três mecanismos de extensão para expandir modelos: (1) expansão de entidades baseadas na entidade IfcProxy; (2) expansão baseada em conjuntos de atributos; e (3) adicionar

novas definições de entidade. A expansão de entidades pode ocorrer a partir dos padrões originais do IFC, mas adiciona-se novas definições de entidade para fornecer uma atualização dos padrões do IFC. Assim, como não há entidades relacionadas à gestão da qualidade no IFC, então recomenda-se as que são relevantes, como a *IfcQualityManagement* (DING et al., 2017). Segundo Wu *et al.* (2021), a geologia, como pré-requisito e fundamento dos projetos de construção de engenharia, não está totalmente refletida na estrutura do IFC. Visto isso, esses pesquisadores resolveram o problema de inconsistência de dados padrões, pois adotou-se um método de estender a entidade IFC para descrever objetos de engenharia geotécnica, como modelo de estrutura geológica. Então, eles empregaram para o mapeamento um-para-um a extensão IFC para o modelo geológico e isso possibilitou a saída do modelo geológico baseado no padrão IFC estendido.

Rhinoceros 3D é um software de modelagem que possui integração com outros programas, além de custo-benefício e uma plataforma intuitiva, em comparação com Civil 3D e Blender. Embora o Rhinoceros não seja software específico de projeto de infraestrutura, ele suporta características que os tornam promissores para futuras aplicações no campo da infraestrutura BIM (BIANCARDO *et al.*, 2020).

No estudo de Biancardo *et al.* (2020) foi utilizado o Rhinoceros com o plug-in VisualARQ, na qual suporta apenas o uso do IFC 2x3. O Rhinoceros atribui cada elemento geométrico a uma camada e permite a especificação de informações do material, porém essas informações são perdidas no momento da conversão para o formato de arquivo IFC. Para contornar esse problema, as informações sobre os materiais de infraestrutura foram inseridas manualmente no arquivo IFC. Portanto, existem versões de softwares com incompatibilidades, mas é possível inserir informações no IFC para ocorrer a interoperabilidade.

Segundo Ferronato (2020), embora o Excel não seja uma ferramenta específica para projetar e operar bancos de dados relacionais, ele permite simular um banco de dados, extrair dados de tabelas dinâmicas, fazer consultas, usar lógicas e fórmulas para obter as informações necessárias, além de proporcionar interoperabilidade com outros softwares.

Desse modo, ao utilizar o BIM em projetos de infraestrutura e o padrão IFC é notável o benefício de colaboração, análises mais precisas e um gestão de ativos eficaz ao longo do ciclo de vida do projeto.

## 2.2 ESTIMATIVA DE CUSTO

O orçamento de um projeto é diferente de uma estimativa de custo. Orçamento é a identificação, descrição, quantificação, análise e valoração de mão de obra, equipamentos, materiais, custos financeiros, custos administrativos, impostos, riscos e margem de lucro desejada para adequada previsão do preço final de um empreendimento (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2015). Já a estimativa de custo é uma avaliação que dispõe de uma ideia de ordem de grandeza do custo do empreendimento e que não elimina a necessidade de elaborar o orçamento analítico (MATTOS, 2019). Nesse sentido, o uso do BIM pode ser usado para gerar estimativas de custo, permitindo que os profissionais analisem mudanças de escopo durante as fases de projeto (CASTELO, 2024).

A abordagem tradicional de estimativa de custos é uma tarefa árdua e demorada, levando a resultados com baixa precisão e confiabilidade, o que pode causar aumentos de custos e atrasos no projeto (FERRONATO, 2020). Nessa perspectiva, destaca-se que para ter a precisão de uma estimativa de custo para componentes de infraestrutura de transportes é importante ter uma previsão e um planejamento. As informações de projetos em BIM podem ser utilizadas para análises mais detalhadas que levarão a maiores economias (COSTIN *et al.*, 2018).

Ressalta-se que a precisão de quantitativos emitidos pelos softwares ajudam em projetos de infraestrutura, porém o nível de aplicação desses quantitativos de serviços e/ou insumos é uma variável, pois um orçamento depende do sistema do mercado local, estratégias de impulso adequadas, ambiente de suporte e existência de banco de dados de custo confiável e software compatível (VITÁSEK; MATĚJKA, 2017).

Costin *et al.* (2018) abordam sobre a recomendação de realizar várias análises sobre desafios do retorno sobre o investimento e a economia de custos antes de implementar o BIM nos projetos, pois para aquisição de software habilitado em BIM, aquisição de hardware para operar o software, atualização dos sistemas de TI atuais, educação de engenheiros, alteração dos métodos e entregas de projetos tem alto custo.

As principais vantagens de uso do BIM 5D, que é a dimensão de estimativa de custo, estão o levantamento de quantidade, estimativa de custos, controle de custos, análise de custos do ciclo de vida e sinistros (VIGNEAULT *et al.*, 2020). Nesse contexto, Ferronato (2020) apresenta os pontos importantes para um fluxo de trabalho para a estimativa de custo, como a rápida elaboração de estimativa de custo nos estágio iniciais de projeto, facilidade de atualizar projetos

em caso de mudança, personalização, dados históricos agrupados e organizados para projetos da mesma tipologia, entre outros.

No estudo de Ibrahim e Elshwadfy (2021), destacou-se que os fatores mais significativos que afetam as estimativas de custos são desenhos claros e detalhados, especificações e documentação do projeto, experiência e nível de habilidade do orçamentista, integridade das informações de custos, materiais e experiência em projetos similares. Portanto, a estimativa de custo de projetos depende de vários fatores, mas se o projeto for em BIM, o nível de qualidade da estimativa de custo aumenta.

### 2.2.1 Estimativa de custo para projetos de infraestrutura

A eficácia de uma estimativa de custo de projetos de infraestrutura é fundamental para ocorrer o sucesso de um empreendimento. Geralmente, as obras de terraplenagem representam cerca de 25% do total dos custos em construção de estradas e isso, pode aumentar consideravelmente dependendo do local onde a estrada será construída (HARE; KOCH; LUCET, 2011).

No estudo de Barros (2019) a estimativa de custo foi desenvolvida em três métodos, os determinístico, probabilístico e inteligência artificial (Figura 2). Nos métodos determinísticos, as estimativas são empregadas as composições de custo unitário com bases referenciais, pelo SICRO e SINAPI. No método probabilístico utilizam-se a análise de regressão e a previsão por classe de referência. Já na inteligência artificial destacam-se as redes neurais artificiais e o raciocínio baseado em casos.

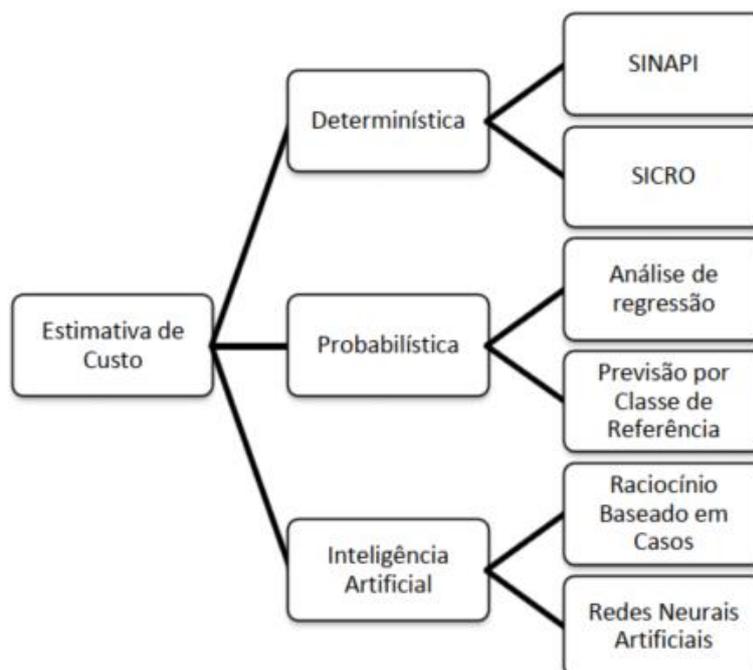


Figura 2 – Métodos de estimativa de custo (BARROS, 2019)

O estudo de Barakchi, Torp e Belay (2017) explorou diversos tipos de métodos de estimativa de custos empregados em projetos de transporte, dos anos de 2002 a 2015, e identificou que o método paramétrico é comum ser utilizado em todos os modos de transportes, menos em infraestrutura aeroportuária, conforme a Figura 3. Além disso, cabe destacar que os autores desse estudo informaram por meio dos programas de softwares e dos custos unitários são muito utilizados em projetos de rodovia. Já nos projetos ferroviários têm evidência do uso do método paramétrico, redes neurais artificiais e simulação de Monte Carlo, sendo este último um método estatístico.

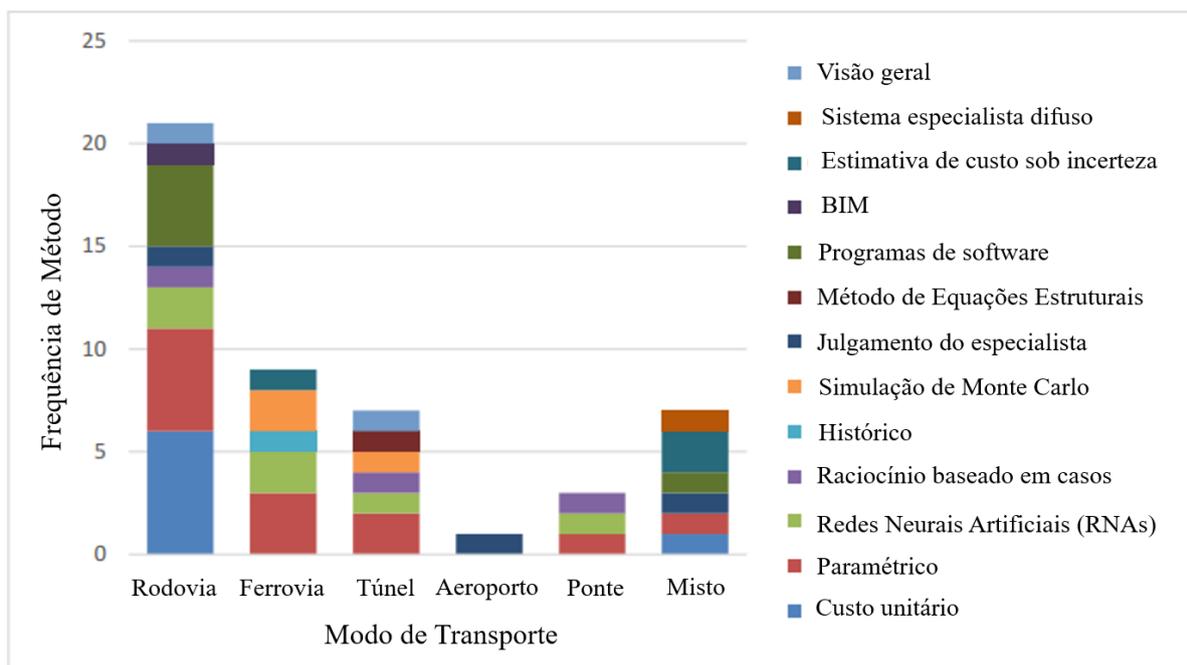


Figura 3 – Métodos de estimativa de custos por cada modo de transporte (Adaptado de BARAKCHI; TORP; BELAY, 2017)

Os métodos de estimativa de custos podem variar na aplicabilidade e eficácia, dependendo das características específicas de projetos de infraestrutura de transporte. Ainda no estudo de Barakchi, Torp e Belay (2017), foi analisado a frequência de utilização do tipo de método por ano. Observa-se na Figura 4 que o método de programas de software, redes neurais artificiais, paramétrico, custo unitário têm predominância na maioria dos anos.

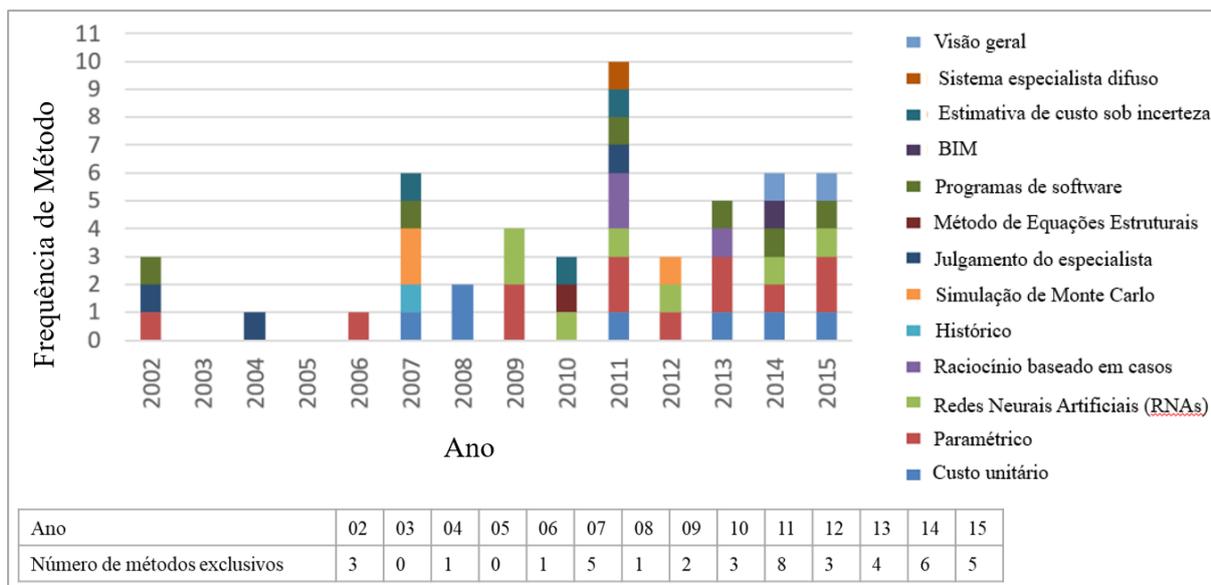


Figura 4 – Métodos de estimativa de custos nos anos de 2002 a 2015 (Adaptado de BARAKCHI; TORP; BELAY, 2017)

Em vista disso, Barakchi, Torp e Belay (2017) destacaram que os fatores que tornam os métodos de estimativa de custos exclusivos são o modo de transporte, complexidade, disponibilidade de dados, incerteza, risco, localização geográfica, tecnologia e inovação. Assim, esses fatores proporcionam precisão e confiabilidade das estimativas de custo, o que induz um melhor planejamento e à tomadas de decisões.

### 2.2.2 Legislação

O contínuo desenvolvimento da Engenharia de Custos e em conformidade com os aspectos legais, a Lei nº14.133, de 1º de abril de 2021, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública. No Art. 19, § 3º, nas licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura informa que será preferencialmente adotado o BIM ou tecnologias e processos integrados similares ou mais avançados.

O Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020, estabelece a utilização do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia, realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal. Nessa perspectiva, o Decreto nº 11.888, de 22 de janeiro de 2024 avança e dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM no Brasil – Estratégia BIM BR, para estimular a concorrência no mercado, aumentar a participação e acesso dos profissionais de projetos e obras, assim como estimular o desenvolvimento da documentação digital de ativos.

Em vista da importância do BIM no Brasil, a implantação dessa metodologia está amparada legalmente. A VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., que é uma empresa pública, vinculada ao Ministério da Infraestrutura, emitiu o Plano de Execução BIM. Este documento define a estratégia e processos BIM, realizados entre contratante e proponente, para a conclusão bem-sucedida de projeto de ferrovias em BIM/GIS. Assim, o processo é ocorrido tanto na fase de pré-contrato como no pós-contrato.

A legislação e os documentos referenciais são fundamentos para a aplicação do BIM, inclusive na estimativa de custo de projetos com essa metodologia. O Decreto nº 7.983, de 8 de abril de 2013, define regras e critérios para a elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União. No art. 3º, parágrafo único, consta que o SINAPI deve ser mantido pela Caixa Econômica Federal (CEF), segundo definições técnicas de engenharia da CEF e de pesquisa de preço realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). E no Art. 4º desse Decreto destaca que o custo global de referência dos serviços e obras de infraestrutura de transportes deve ser obtido a partir das composições dos custos unitários de referência do SICRO.

Além disso, ressalta-se também a disponibilidade do Sistema de Custos Referenciais Ferroviários (SICFER), criado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), que apresenta as metodologias, conceitos, critérios e parâmetros utilizados no desenvolvimento do projeto, cuja finalidade é a elaboração de composições de custos referenciais para subsidiar os orçamentos de projetos ferroviários (ANTT, 2019).

### **2.2.3 Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO)**

A estimativa de custo desempenha um papel fundamental na gestão eficaz de projetos de infraestrutura de transportes, influenciando diretamente na viabilidade financeira. O SINAPI e o SICRO representam fontes para a orçamentação de obras e serviços de engenharia em licitações que prevejam o uso de recursos dos orçamentos da União, porém o SICRO é específico para obras de infraestrutura de transportes.

Em vista do desenvolvimento de tecnologias e serviços, além da dinâmica das obras de infraestrutura de transportes, é imprescindível a evolução dos sistemas de custos do extinto Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER) e do atual responsável pela infraestrutura do Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Os marcos de desenvolvimento do sistema de custos dessa autarquia são exibidos na Figura 5.

Ano	Principais Marcos Históricos
	Organização da Gerência de Custos Rodoviários - GEC
1992	Criação e lançamento do Sicro 1 - Sistema de Custos Rodoviários
	Início da expansão da pesquisa de preços para outros estados
1993	Regionalização da pesquisa de preços do Sicro 1
1998	Lançamento do Sicro 2 - Sistema de Custos Rodoviários
2000	Implantação do Sicro 2
2003	Publicação do Manual de Custos Rodoviários do Sicro 2
	Criação da Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes
2006	Início do Projeto SINCTRAN (Termo de Cooperação celebrado com o Centro de Excelência em Engenharia de Transportes - CENTRAN / Departamento de Engenharia de Construção do Exército Brasileiro - DEC/EB)
2011	Término do Termo de Cooperação com o DEC/EB
2012	Contratação da Fundação Getúlio Vargas para revisão do SICRO e realização da pesquisa nacional de preços de insumos
2013	Divulgação das tabelas de preços do Sicro 2 para todas as unidades da federação
2014	Instauração da Câmara Técnica do SICRO
2015	Criação das Coordenações Setoriais de Custos Referenciais - CCR, de Preços Novos - CPN e de Orçamentos de Infraestrutura - COI
2017	Implantação do SICRO

Figura 5 – Evolução dos sistemas de custos do DNER e DNIT (Adaptado de DNIT, 2017)

No primeiro semestre de 2017, o DNIT lançou a terceira versão do sistema, denominado SICRO 3 (NORONHA; OLIVEIRA, 2018). Em consonância à história do SICRO, outras inovações relevantes no presente Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes, do DNIT, referem-se à metodologia para definição de custos de referência de canteiros de obras e de administração local, diferenciação das taxas referenciais de bonificação e despesas indiretas em função da natureza e do porte das obras, como também o custo horário de equipamento e mão-de-obra, adequação dos custos em função do fator de influência de chuvas, entre outros.

Os relatórios SICRO são disponibilizados pelo DNIT, em arquivos com formato .xlsx e .pdf, e são divididos por região do país e por meses. Dessa maneira, é possível obter a base de dados do SICRO atualizados e gratuitamente. Esse banco de dados apresenta serviços com relatório analíticos e sintéticos de composições de custo, encargos sociais, equipamentos, mãos de obra e materiais.

## 2.3 AUTOMATIZAÇÃO DE DADOS

Os projetos de infraestrutura foram classificados como repetitivos por Moselhi e Hassanein, (2003) devido ao traçado linear, como rodovias, gasodutos e ferrovias. Esses projetos seguem um conjunto de regras e códigos que precisam ser repetidos ao longo de toda a via. As tarefas com essas características podem ser automatizadas usando recursos BIM e uma delas é escrever relatórios baseados em tabela, pois eles podem ser extraídos automaticamente com base nas informações do modelo (HÜTHWOHL *et al.*, 2018).

No estudo de Soilán *et al.* (2021) apresenta uma metodologia automatizada que, primeiramente extraiu de forma confiável a posição e a geometria dos trilhos ferroviários a partir de dados de nuvem de pontos tridimensionais da infraestrutura, aplicando sequencialmente o processamento de nuvem de pontos. Em seguida, essas informações foram usadas para gerar o alinhamento da via ferroviária, seguindo os requisitos do padrão de IFC de alinhamento.

Um subconjunto do esquema de dados e dos dados referenciados é chamado de *Model View Definition* (MVD). Um MVD específico é definido para suportar um ou mais fluxos de trabalho, sendo que cada um identifica requisitos de troca de dados para software, segundo a ISO 16739-1 (2024). No estudo de Huang *et al.* (2022) foi realizada uma análise geotécnica MVD para destacar ainda mais as informações necessárias para avaliação geotécnica com base no modelo IFC. O resultado apresentou um fluxo de trabalho sustentado por técnicas heurísticas e os autores demonstraram uma solução de projeto automatizado em vista da viabilidade e da flexibilidade de criar uma conexão entre o projeto BIM e as interfaces de modelagem numérica, com técnicas avançadas de modelagem computacional e programação.

As pontes estão entre as obras em que o Open I-BIM é mais eficaz para o setor de infraestrutura (SALZANO *et al.*, 2023). Rashidi e Karan (2018) estudaram um processo automático e econômico de videogrametria para Modelagem de Informações de Pontes (BriM) que requer apenas câmeras comuns ou smartphones para filmar a ponte de vários pontos de vista. Os resultados mostraram que o videogrametria apresentado é capaz de gerar nuvens de pontos precisas e de boa qualidade, portanto é uma abordagem promissora que pode ajudar a melhorar a eficiência e a relação custo-benefício dos projetos de pontes.

### 2.3.1 Linguagem de programação visual

Para produzir uma automação é comum utilizar linguagens de programação. Dynamo é uma linguagem de programação visual no software Revit e Civil 3D e é utilizada para trabalhar com

dados de produtos representados semanticamente. Kebede *et al.* (2022) utilizaram o Dynamo integrado no Revit em combinação com python a fim de ter processos automatizados.

A linguagem de programação visual e a linguagem em python podem ser desenvolvidas para integrar duas fontes de dados, o que enriquece o modelo. O Dynamo possui nós de *script* para desenvolver programas para criar o link entre o banco de dados e o modelo BIM. (MARMO *et al.*, 2020). Já no estudo de Khan *et al.* (2019) converteu as informações necessárias das regras de segurança em algoritmos gráficos em um único ambiente de *script* por meio do Grasshopper, ferramenta para programação visual e é um plugin para o software Rhinoceros.

Com a integração de novas tecnologias de projeto, como a linguagem de programação visual, os projetistas podem personalizar os fluxos de trabalho de projeto com experiência de domínio incorporada para satisfazer seus requisitos específicos, em vez de confiar nas previsões BIM existentes (KENSEK, 2014; VALINEJADSHOUBI; BAGCHI; MOSELHI, 2019).

A utilização de linguagem de programação associada com os processos BIM proporciona ao projetista uma grande precisão e confiabilidade de dados. Lee, Park e Yoon (2020) publicaram uma estrutura inovadora para extrair automaticamente parâmetros de projeto de pontes a partir de dados de nuvem de pontos com resultados ideais e apresentou apenas 0,8% de erro na estimativa de parâmetros.

Tang *et al.* (2020) usaram um ambiente de linguagem de programação visual avançado para integrar a análise estrutural do pavimento no projeto rodoviário em BIM. Já Park, Kim e Seo (2022) concentraram-se em métodos para automatizar operações manuais onerosas e propensas a erros, como remoção e registro de nuvens de pontos e modelagem 3D de um projeto ferroviário, dentro de ferramentas baseadas em BIM. No estudo de Kim *et al.* (2016) desenvolveu uma abordagem BIM baseada em objetos inteligentes, a partir de informações sobre estimativas de custos derivadas automaticamente.

Portanto, a linguagem de programação visual é uma linguagem de *Script* baseada em gráficos que permite aos usuários criar programas de software com base em notações gráficas apoiadas por semântica e sintaxe bem definidas (KEBEDE *et al.*, 2022). Dessa maneira, a VPL permite aos projetistas gerar modelos complexos sem conhecimento prévio de programação.

### **2.3.2 Ontologia na integração de dados**

Uma ontologia de domínio pode melhorar a interpretação automatizada e a compreensibilidade de um texto. O domínio específico semântico e os elementos de informação flexíveis são para

alcançar uma semântica relativamente profunda, como maneira de analisar frases complexas e reconhecer o significado do texto específico do domínio (ZHANG; EL-GOHARY, 2016).

Para facilitar a integração de dados, um método para representar semanticamente dados de produtos vinculados ao padrão de um documento é a ontologia Web Semântica, que facilita o processo de comunicação de um sistema (KEBEDE *et al.*, 2022). O desenvolvimento do IFC dos projetos de infraestrutura pode ser contribuir com a ontologia para aumentar a abrangência das informações em um modelo BIM, bem como a interoperabilidade do software (COSTIN *et al.*, 2018).

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

A condução dessa pesquisa utilizou o *Design Science Research* (DSR) e teve como um dos objetivos de desenvolver informações da aplicação e análise da automação de fluxo de estimativa de custo de projeto de infraestrutura em BIM. Além disso, cabe informar que essa pesquisa foi direcionada por meio do Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL) para o melhor fundamento.

#### 3.1 MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA

Para o conhecimento do estado da arte desse estudo foi necessário seguir etapas, conforme detalhado na Figura 6. Primeiramente, realizou-se uma busca estratégica no banco de dados da *Web of Science*, na qual foi delimitado para título, resumo ou palavras-chaves dos artigos com os termos: "cost estimate" OR "cost" AND "infrastructure project" OR "infrastructure" AND "IFC" OR "automated information" OR "information automation" OR "VPL" AND "BIM".



Figura 6 – Fluxograma do Mapeamento Sistemático da Literatura

Na segunda etapa, realizou-se a busca de artigos e artigos de revisão com o idioma em inglês e que foram publicados nos anos de 2013 a 2023, dentre a categoria da *Web of Science*: “*Engineering Civil or Economics or Transportation or Business Finance or Automation Control Systems*”. Em seguida, foi realizada uma análise dos resumos desses artigos a fim de ter o conhecimento de uma pequena amostra sobre o era desenvolvido nos artigos, para relacionar com o objetivo deste estudo. Então, de 2427 publicações, ao final selecionou-se 59 artigos.

Na última etapa realizou-se uma análise bibliométrica do quantitativo dos artigos por meio do software VOSviewer 1.6.18 para elaborar a rede de interconexões entre autores e países que mais publicaram e palavras-chaves mais utilizadas. Desse modo, foi possível obter conhecimento científico para estruturar a pesquisa.

### 3.2 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa adotou a metodologia *Design Science Reserch* (DSR), na qual apresenta um ciclo com abordagem natural: analisar o problema, projetar uma solução e implementar testes para validação. A DSR na gestão de operações pode ser considerada como uma transferência consciente da estratégia usada na pesquisa de engenharia (VAN AKEN; CHANDRASEKARAN; HALMAN, 2016). Na Figura 7 apresenta o processo da metodologia DSR.

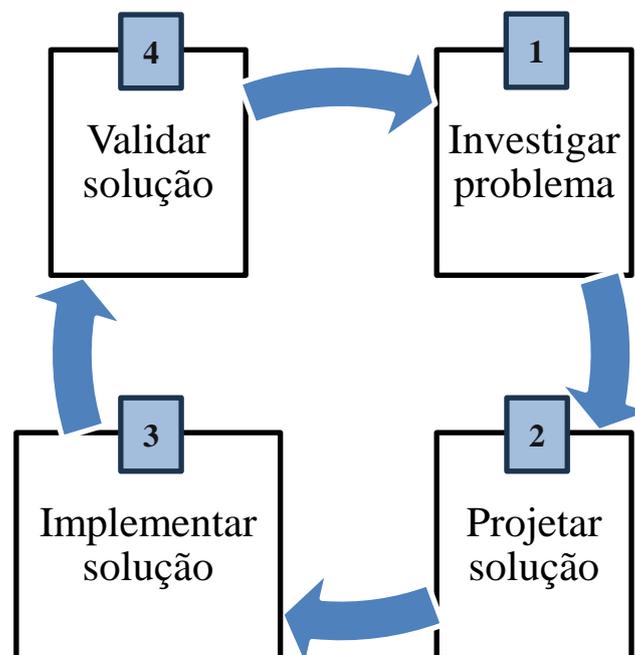


Figura 7 – Metodologia *Design Science Reserch* (Adaptado de WIERINGA, 2009)

Na etapa de investigação do problema é onde se obtém um melhor entendimento da problematização da pesquisa, onde foi apresentada no Capítulo 1, assim como analisado cientificamente no Capítulo 2 sobre a interação de projeto de infraestrutura em BIM, custo estimado e automação.

Segundo Wieringa (2009), na segunda etapa elaborou um pré-projeto para iniciar uma ideia de solução. Assim, necessita-se esclarecimento de todos os problemas para que esse pré-projeto seja eficaz. Dessa maneira, foi definido o processo e elementos para serem utilizados para elaboração de um projeto inicial, com a determinação de fases para que ao final do ciclo seja sanado o problema.

Na etapa 3 foi implementada a solução do pré-projeto para verificar se atende todos os requisitos de solução, ou seja, a utilização do fluxo de dados para aplicar a estimativa de custo com automação. Já na quarta etapa foi analisada a solução projetada para a problematização, em que nesse estudo foi por meio de estudo de caso e entrevistas com profissionais da área de infraestrutura. Uma vez não sendo atendido todos os requisitos, o ciclo tende a continuar para apontar novos problemas para serem solucionados ou adotar melhorias.

Destaca-se que o DSR é orientado à solução de problemas específicos, buscando não uma solução ótima, mas sim uma solução que seja viável e passível de ser generalizada para uma série de obstáculos (OLIVEIRA, 2022), ou seja, uma possível solução para ser utilizada em qualquer projeto de infraestrutura que abrange a terraplenagem.

Para aplicar o método DSR, necessitou-se abranger 7 etapas nesta pesquisa (Figura 8). O processo se inicia com um modelo de projeto de infraestrutura ferroviária no software Civil 3D e em seguida, foi elaborado no Dynamo o *script* 1, na qual tinha a entrada de informações do modelo e dados de saída em 3 planilhas do Excel para obter o resultado de quantificação de serviços de terraplenagem. Além disso, criou-se uma planilha de base de dados de estimativa de custo com a quantificação. Na etapa 4 foi necessário criar uma configuração nas propriedades do modelo.

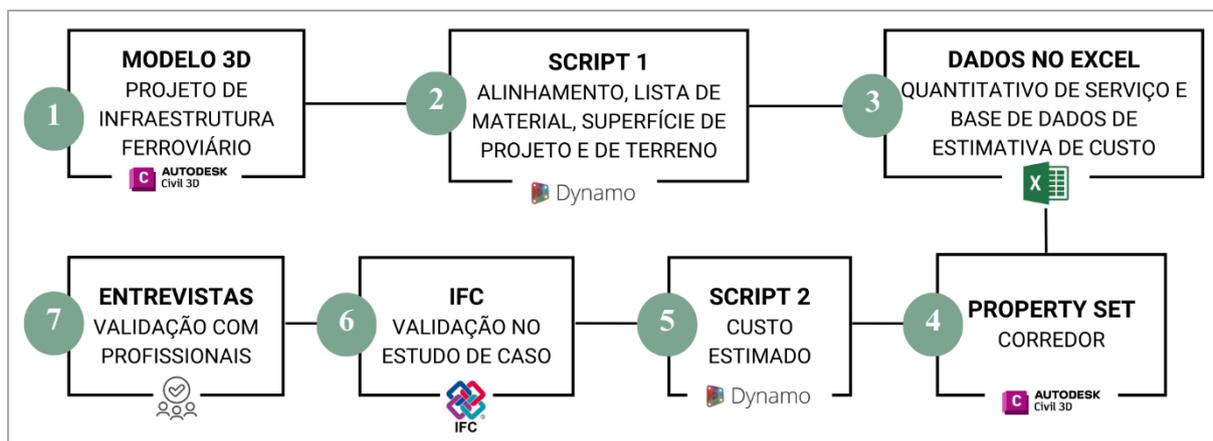


Figura 8 – Etapas da metodologia de estudo

No etapa 5 utilizou-se *no script 2* a entrada de informação a planilha de base de dados de estimativa de custo e o resultado foi o preenchimento automático das informações no *property set* do corredor do modelo. Assim, nas etapas 6 e 7, o fluxo semiautomatizado foi validado por meio do IFC do modelo e por meio das entrevistas com profissionais da área, respectivamente. Destaca-se que na etapa 3 foram emitidas 3 planilhas do resultados do *script 1*, que é o volume de terraplenagem, matriz de distâncias e a distribuição de terra, conforme o fluxograma da Figura 9.

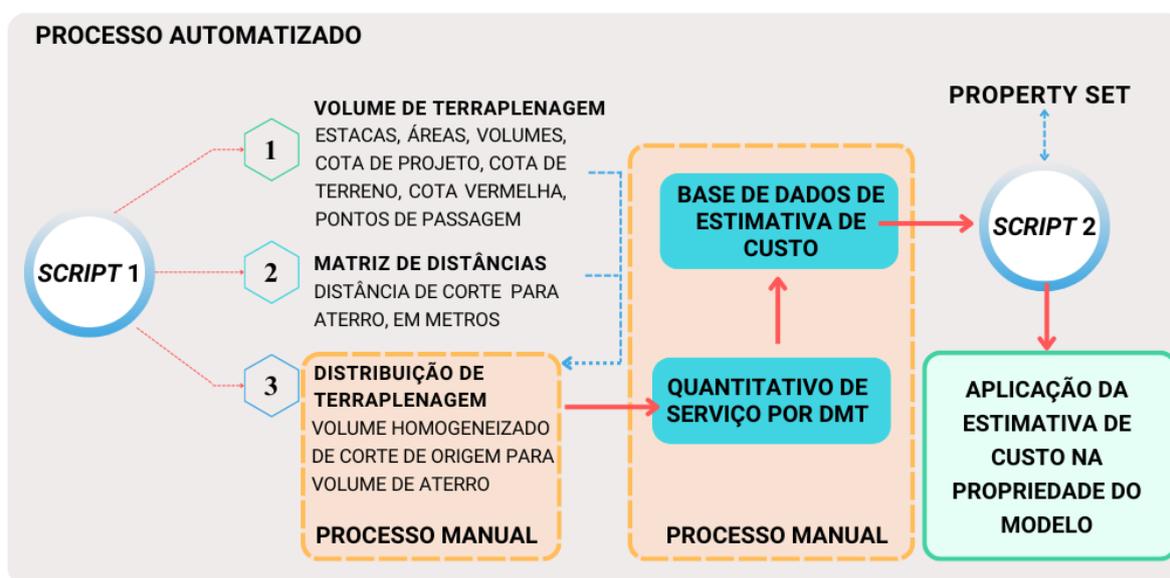


Figura 9 – Fluxograma de resultados do *script 1* e *script 2*

Com a integração dos dois primeiros produtos é suficiente tomar a decisão de distribuição de terra de corte para aterro. Porém, ao utilizar o Excel, o projetista precisa aplicar fórmulas, para consolidar as informações das 3 planilhas, e registrar qual será o destino do volume

homogeneizado, para ter um quantitativo de serviço por DMT, assim como também indicar a quantificação em uma base de dados de estimativa de custo no Excel. Enfatiza-se que esse processo necessita da análise e decisão do projetista, então é um processo manual.

O resultado da base de dados de estimativa de custo é a entrada de informações no *script 2*, que este faz associação com o *property set* do modelo. O produto final do *script 2* é a aplicação na propriedade do modelo da estimativa de custo, com descrição do serviço, unidade, base, código, quantidade, custo unitário, custo total e data-base. Portanto, todo o processo da metodologia de estudo é automatizada, com exceção nessas atividades com Excel, o que torna um processo semiautomatizado.

Desse modo, em vista da necessidade do fluxo de informações com precisão e confiabilidade de um projeto de infraestrutura ferroviária em BIM, necessita-se compreender o desenvolvimento das atividades de quantificação para estimativa de custo em BIM, para que seja aplicada uma condução tecnológica de programação, bem como analisar o projeto de ferrovia para realizar mudanças e transformar as situações em busca de melhorias com foco na estimativa de custo.

### 3.3 ESTUDO DE CASO

O objeto de estudo é um projeto de infraestrutura ferroviária na qual abrange áreas dos estados de Tocantins e de Goiás, referente ao Segmento do km 307+125 ao km 407+125. A localização desse segmento está exibida na Figura 10.



Figura 10 – Localização de implantação de ferrovia

Cabe informar que esse projeto foi elaborado por meio do software AutoCAD 2D, Civil 3D, Revit, Navisworks, Infracore e Compor 90, além de utilizar a metodologia BIM, em novembro de 2021.

Segundo os autores do projeto em questão, para computar materiais, eles exportaram as planilhas do software com a informação de tipo de área, área, volume, volume acumulado, estaca, coordenadas, cota de terreno, cota de projeto, diferença de elevação. Já a distribuição de terra foi realizada manualmente com aplicação de fórmulas no Microsoft Excel. Além disso, foi atribuído a distância média de transporte entre conjuntos de seções de corte para conjuntos de seções de aterro, ou seja, distância média de onde tem maior volume de solo no conjunto de corte para a estaca que apresenta maior volume de solo no conjunto de aterro. Assim, utilizou-se um DMT estimado.

Para este estudo foi utilizado o trecho km 306+860 até km 308+540, ou seja, 1680 metros, que possui apenas solo de 1ª categoria. Considerou-se dados das estacas de corte e aterro, mas não foram utilizadas informações de bota-fora, jazida, compensação lateral e camada final, assim restringiu o uso do solo para distribuição de corte para aterro e vice-versa.

Sabe-se que quanto maior a acurácia de uma estimativa de custo, melhor a confiabilidade das informações de projeto. Assim, para aplicar a precisão de quantitativos de serviços de terraplenagem relacionada à distribuição de terra com automações, foi necessário obter a quantificação de dados de terraplenagem do projeto.

### **3.4 SCRIPT 1**

Para ter o quantitativo de distribuição de terra foi necessário obter primeiramente os dados de áreas e volumes das estacas, indicação sequencial de corte e aterro, cota do terreno, cota de projeto, além de ter informações do volume dos pontos de passagens de corte para aterro e vice-versa. Além disso, as distâncias entre as estacas e pontos de passagens também foram obtidas para definir o aterro mais próximo de cada corte, a fim de definir a menor classificação de DMT, o qual influencia diretamente no custo, pois quanto maior o DMT, maior o custo.

Um modelo de projeto de infraestrutura possui todas essas informações, mas é relevante que elas sejam apresentadas em um documento, para facilitar e flexibilizar as análises e os critérios realizados pelos projetistas.

No programa Autodesk Civil 3D utilizou-se o plugin Dynamo, que é uma ferramenta de programação visual, na qual possibilita os usuários criarem *scripts* e definições lógicas

personalizadas. Todos os nós possuem dados de entrada e saída, permitindo realizar uma conexão entre eles e assim ter um fluxo de informações. Por meio desta ferramenta foi possível criar o *script 1* para extrair dados do projeto.

Inicialmente, criou-se os nós *surface*, *select objects* e *string* para serem os dados de entrada na rotina. Esses dados foram a superfície do terreno e a superfície de projeto, alinhamento e a lista de materiais de corte e aterro (Figura 11).

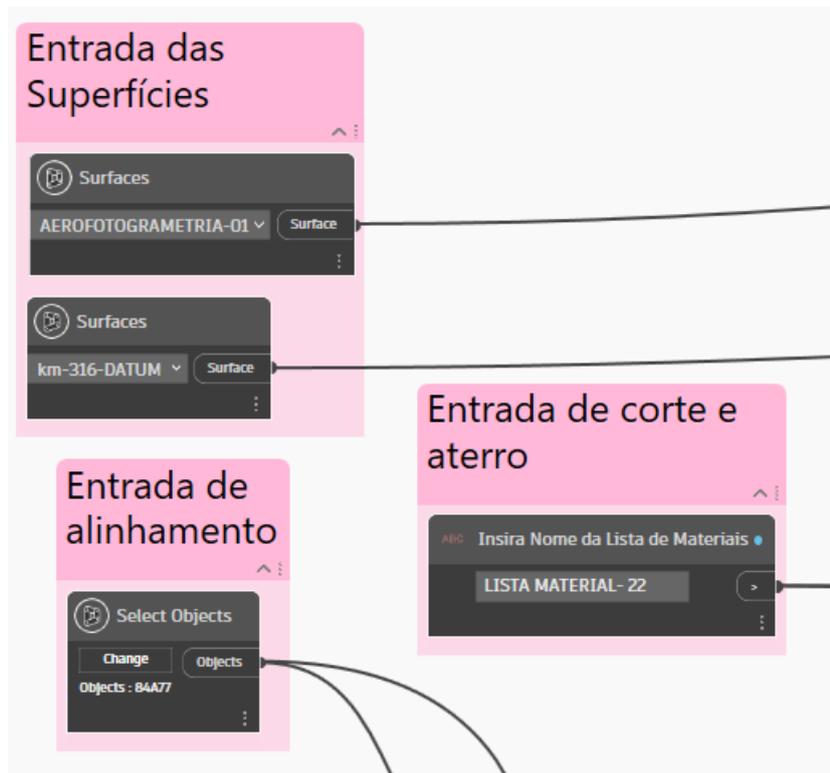


Figura 11 – Entradas de informações no *script 1*

As entradas de informações nos nós possuem integração com o modelo BIM, por exemplo, ao criar o nó *surface*, nele são apresentadas todas as superfícies que estão no projeto. Assim, os nós permitem que os usuários tenham a flexibilidade e interoperabilidade para ter informações do modelo. Então, a partir dos dados de entrada foi criada lógicas em um processo de programação visual, definindo as relações entre dados, sempre com o intuito do produto final ser 3 planilhas.

A primeira planilha teve o intuito de possuir dados de estaqueamentos; indicação sequencial de corte, aterro e pontos de passagens, que são quando a superfície do terreno e o greide são iguais; cota do terreno; cota de projeto; cota vermelha, que é a diferença entre a topografia e o greide; áreas e volumes das estacas. Já para a segunda planilha teve como objetivo de apresentar uma matriz das distâncias das estacas de corte para aterro, a fim do projetista identificar a menor

DMT. E por último, a terceira planilha tinha o intuito de apresentar um padrão de distribuição de terraplenagem, com a origem e destino de corte para aterro. No Apêndice A observa-se o fluxo o *script* 1.

### 3.5 DISTRIBUIÇÃO DE TERRAPLENAGEM

Para maior precisão dos quantitativos de serviços da distribuição de terraplenagem, identificou-se os pontos de passagens. Contudo, como o Civil 3D não identifica o volume desses pontos, foi necessário verificar se eles eram corte ou aterro por meio da estaca anterior e estimar o volume pela equação abaixo, onde  $V$  é o volume e  $x$  é número da estaca analisada. Sendo assim, os dados de volume de pontos de passagens foram acrescentados manualmente.

$$V = \frac{(estaca_x - estaca_{x-1})}{\acute{a}rea_{x-1}} \quad (3.1)$$

Em vista que o resultado do *script* 1 foi 3 planilhas e para facilitar a interoperabilidade de informações, então todas foram compiladas em um único arquivo, por meio das funções do Excel: *procv*, *índice*, *corresp*, *ses* e *somases*.

Constatou-se que todos os dados foram adquiridos para realizar a distribuição de corte para aterro, na qual apresentou um sistema de oferta e demanda. Conforme o fluxograma da Figura 12, tem-se a origem de solo de um corte e o projetista escolhe qual o aterro mais próximo, por meio do resultado do *script* 1. Assim, faz-se a verificação se o volume do corte foi possível sanar a necessidade de volume de aterro. Se o resultado for positivo, destina-se o restante para outro aterro mais próximo, caso contrário, utiliza-se a oferta de solo de um próximo corte para sanar a demanda do aterro analisado. Portanto, é um processo iterativo para propor rapidez ao projetista.

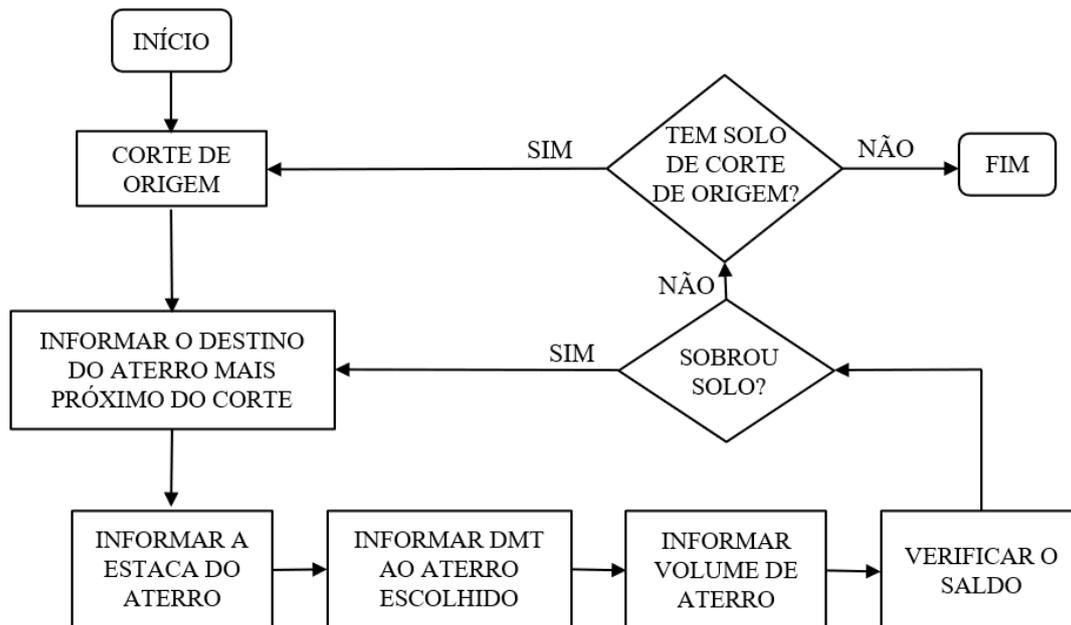


Figura 12 – Fluxograma para distribuição de terra de corte para aterro

Após realizar a distribuição de solo dos cortes manualmente, é possível obter o quantitativo do serviço de escavação, carga e transporte com a classificação do DMT, e do serviço de compactação de aterro, que é todo o solo transportado. Assim, tem-se o quantitativo de serviços para informar na estimativa de custo do projeto.

### 3.6 BASE DE DADOS DE ESTIMATIVA DE CUSTO

Uma estimativa de custo contém a descrição do serviço e os respectivos componentes, que são a unidade, base referencial, código de referência, quantidade, custo unitário, custo total e data-base. Os serviços utilizados nessa pesquisa foram os mesmos dentre os apresentados no orçamento do estudo de caso, com a data-base dos custos SICRO correspondente ao mês de outubro de 2021, estado de Tocantis/TO.

Nessa pesquisa foram utilizadas 6 composições de custos de serviços de escavação, carga e transporte em material de 1ª categoria, com variações de DMT, e 1 composição de serviço de compactação de aterros a 100% do proctor normal. Para melhor exposição sobre os serviços utilizados, na Figura 13 apresenta a composição analítica de custo do serviço de escavação, carga e transporte em material de 1ª categoria com DMT de 50 metros, base referencial SICRO, data-base de outubro de 2021, de Tocantis.

CGCIT		DNIT					
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Tocantins		FIC 0,03149			
Custo Unitário de Referência		Outubro/2021		Produção da equipe		286,19000 m³	
5501710 Escavação, carga e transporte em material de 1ª categoria - DMT de 50 m						Valores em reais (R\$)	
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade		Utilização		Custo Horário	
				Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo
E9541	Trator sobre esteiras com lâmina - 259 kW	1,00000		1,00	0,00	593,2530	226,8060
						Custo horário total de equipamentos	
						593,2530	
B - MÃO DE OBRA		Quantidade		Unidade		Custo Horário	
P9824	Servente	1,00000		h		16,0779	16,0779
						Custo horário total de mão de obra	
						16,0779	
						Custo horário total de execução	
						609,3309	
						Custo unitário de execução	
						2,1291	
						Custo do FIC	
						0,0670	
						Custo do FIT	
						-	
C - MATERIAL		Quantidade		Unidade		Preço Unitário	
						Custo Unitário	
						Custo unitário total de material	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade		Unidade		Custo Unitário	
						Custo Unitário	
						Custo total de atividades auxiliares	
						Subtotal	
						2,1981	
E - TEMPO FIXO		Código		Quantidade		Unidade	
						Custo Unitário	
						Custo Unitário	
						Custo unitário total de tempo fixo	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade		Unidade		DMT	
						LN	RP
						P	Custo Unitário
						Custo unitário total de transporte	
						Custo unitário direto total	
						2,20	
Obs.							

Figura 13 – Composição analítica de custo do serviço de escavação, carga e transporte em material de 1ª categoria com DMT de 50 metros

Portanto, após consultar a base referencial SICRO, criou-se manualmente uma planilha de estimativa de custo com esses 7 Composições de Preços Unitários (CPU) com as respectivas informações de componentes: descrição do serviço, unidade, base referencial, código de referência, quantidade, custo unitário, custo total e data-base. Dessa maneira, a metodologia partiu da condição dessa base de dados ser a origem das informações para criar *property set* de estimativas de custos dos serviços no modelo do estudo de caso.

### 3.7 CONFIGURAÇÃO DE PROPRIEDADE

Para automatizar o fluxo de estimativa de custo, foi necessário atribuir *property set* no modelo do projeto, no Civil 3D (Figura 14), com os seguintes nomes: descrição do serviço, unidade, base referencial, código de referência, quantidade, custo unitário, custo total e data-base. Como foram inseridos 7 CPU, então utilizou-se 7 conjuntos com as mesmas descrições.

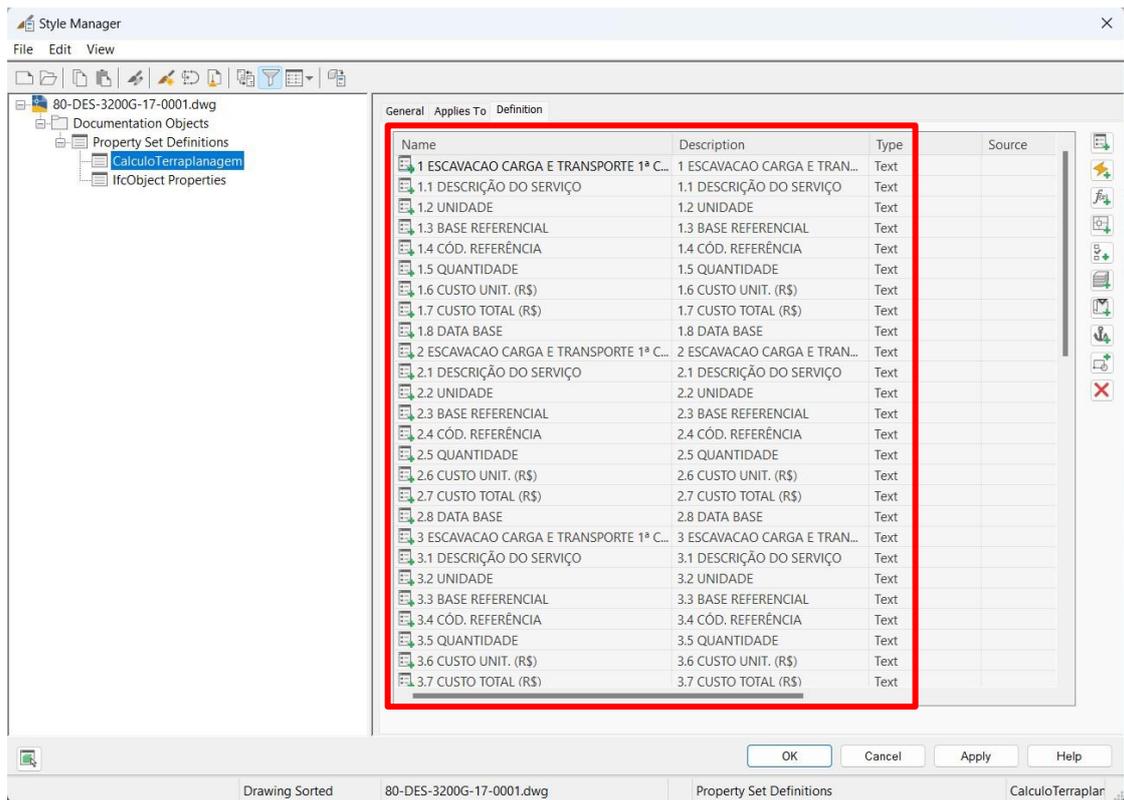


Figura 14 – Configuração de propriedades atribuídas para o corredor

### 3.8 SCRIPT 2

Para ocorrer o preenchimento automatizado na propriedade do modelo, criou-se o *script 2* com dados de entrada e saída. A planilha de base de dados de estimativa de custo foi a entrada de informação no *script*, assim como também a identificação do corredor do projeto (Figura 15). Nessas entradas foi utilizado o nó *File Path*, que importou a planilha de estimativa de custo, e o nó *Select Objects*, o qual identificou o objeto selecionado no projeto.



Figura 15 – Entradas de informações no *script 2*

O *Script 2* teve o objetivo de utilizar lógicas em um processo de programação visual para importar informações da planilha de estimativa de custo e preencher as informações referentes às propriedades que foram apresentadas na base de dados da estimativa de custo, ou seja, descrição de serviço, unidade, base referencial, código de referência, quantidade, custo unitário, custo total e data-base. Assim, como houve compatibilidade entre a base de dados e o *property set* do modelo foi possível obter o produto final automatizado. No Apêndice B apresenta o *script 2*.

A partir do *script 2* exibiu-se as informações da base de dados de estimativa de custo nas propriedades do corredor, por meio da ferramenta *extended data* do Civil 3D. Destaca-se que esse *script* pode ser utilizado em qualquer projeto, desde que contenha a base de dados com as informações de entrada da estimativa de custo da rotina.

### **3.9 IFC PARA VALIDAÇÃO**

No Civil 3D 2024, a exportação do IFC 4x3 foi realizada com os seguintes comandos do software, respectivamente: `IFCInfraSaveConfig`, `IFCInfraSaveMappingConfig`, `IFCInfraSavePropertyTemplates`, `IFCInfraSetProjectBasePoint`, `IFCInfraExport`. Com esses comandos houve o intuito de criar um arquivo de configuração na pasta de desenhos, criar um arquivo de configuração de mapeamento na pasta de desenhos e exportar definição de parâmetro IFC e um mapa de parâmetros do Civil 3D associado. Além disso, foi definido um ponto base para o bloco e, por fim, exportou o projeto para um arquivo IFC.

Já para utilizar o IFC no software de orçamentação, PriMus-IFC BIM, exportou-se apenas as entidades do corredor por meio do `IFCInfraExportSelected`, para o arquivo ter menor tamanho e os dados serem centralizados no corredor.

Para salvar um modelo de mapeamento especificamente de propriedade para um projeto, utilizou-se o comando `IFCInfraSavePropertyTemplates`, que ao executá-lo é criado automaticamente um arquivo `IFCInfraExportPropertyMapping`, em formato `.json`, e outro `IFCInfraExportPropertyMapping`, em `csv`.

Esses arquivos podem ser usados para determinar quais as entidades e conjuntos de propriedades são exportados. Dessa maneira, cabe informar que essa etapa foi importante para verificar se os dados de estimativa de custo atribuídos ao trecho analisado foram apresentados no arquivo IFC.

### 3.10 ENTREVISTAS PARA VALIDAÇÃO

O objetivo das entrevistas foi apresentar a metodologia e resultados dessa pesquisa aos profissionais experientes, para que eles respondessem um questionário e assim, realizar uma avaliação qualitativa. As entrevistas foram realizadas em 3 empresas com orçamentistas, gerentes de projetos em BIM e projetistas na área de geometria e terraplenagem, totalizando 12 profissionais. Destaca-se que cada entrevista tiveram as seguintes etapas:

- 1) Contextualização sobre BIM e estimativa de custos
- 2) Motivação da pesquisa
- 3) Objetivos
- 4) Metodologia aplicada
- 5) *Script 1*: Obter informações automatizadas para quantificar os serviços
- 6) *Script 2*: Inserir a estimativa de custo nas propriedades do corredor de maneira automatizada
- 7) Resultado do IFC do modelo com a estimativa de custo

Para isso, primeiramente foi realizada a identificação dos entrevistados, por meio de e-mail, formação acadêmica, nível de formação, cargo que exerce na empresa, período de experiência profissional, utilização da metodologia BIM e das linguagens de programação. Dessa maneira, foi possível analisar se o entrevistado tem o domínio do assunto abordado e assim, foi possível identificar e explicar detalhadamente algum assunto não dominante pelo entrevistado, a fim dele entender todo o processo.

A segunda seção do questionário tinha o intuito de analisar o nível de facilidade quanto a compreensão do processo da pesquisa e as justificativas como também as devidas dificuldades. Uma escala de Likert de cinco pontos foi usada como formato de resposta para diferentes perguntas, sendo que 1 significa muito difícil e 5 muito fácil.

E na terceira seção do questionário tinha a finalidade de avaliar a perspectiva dos entrevistados em aplicar a metodologia de pesquisa sobre automação de fluxo de informações de um projeto para realizar uma distribuição de terra e para aplicação da estimativa de custo no IFC, além de identificar os benefícios que o processo propõe. No Apêndice C apresenta todo o formulário que foi disponível aos entrevistados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados e discussões obtidos nas etapas propostas da metodologia, sendo elas a análise bibliométrica do MSL, validação por meio do estudo de caso, que expõe sobre os *scripts*, a quantificação para serviços de estimativa de custos, automação de estimativa de custo e software de orçamentação, e a validação por meio de entrevistas, como também as limitações que foram identificadas.

### 4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A partir das etapas para a análise bibliométrica, observou-se a tendência de pesquisa sobre os quatro grupos: custo estimado, infraestrutura, automação e BIM e para isso analisou-se primeiramente a evolução de publicações (Figura 16). No geral, houve uma evolução crescente, mas não constante do total de publicações por ano. No entanto, é visto que entre 2018 e 2023 houve uma evolução no número de publicações. Nota-se que no ano de 2020 e 2021 tiveram 7 e 9 publicações, respectivamente, sendo os anos com mais destaque de publicações.

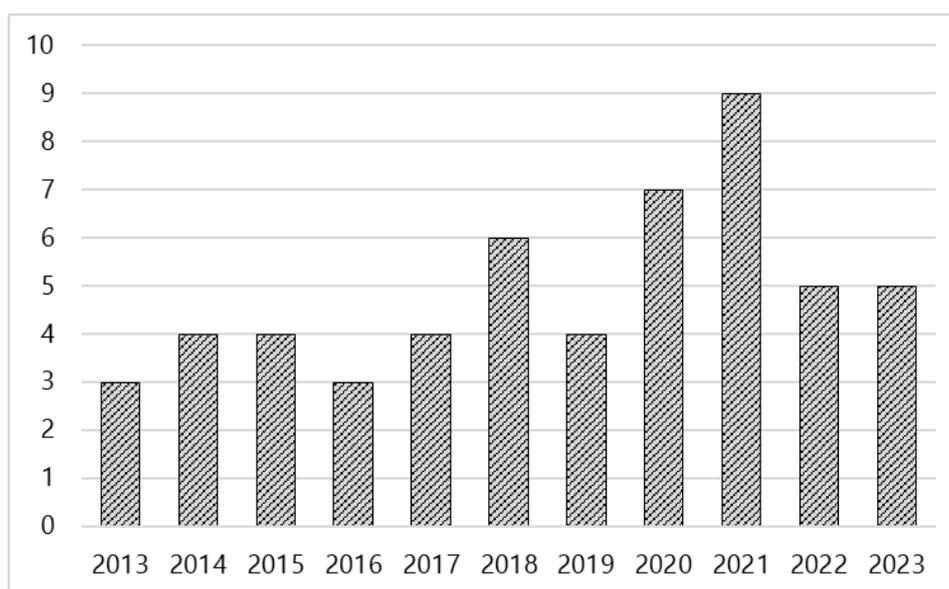


Figura 16 – Quantitativo de publicações por ano

Dentre as coautorias que mais publicaram artigos referentes aos assuntos pesquisados foram Zhang, El-Goharye e Borrman, respectivamente, sendo que Zhang publicou 6 artigos, enquanto que El-Gohary publicou 4 artigos e Borrman foram apenas 3 artigos. Além disso, esses autores foram os mais citados, sendo 495, 463 e 105 citações, respectivamente.

Estados Unidos, Coréia do Sul, China, Alemanha e Austrália foram os cinco países que mais publicaram artigos. O Estados Unidos apresentou a maior taxa de publicações, com 15 no total,

enquanto a Coréia do Sul e China obtiveram 7 publicações cada, sendo uma diferença em cerca de 50% em relação aos Estados Unidos. A Alemanha e Austrália publicaram 4 artigos.

Para identificar as linhas de pesquisas associadas à custo estimado, infraestrutura, automação e BIM, foi criado um mapa de coocorrência de todas as palavras-chaves (Figura 17), por meio do software VOSviewer, onde exibe 4 grupos de assuntos e cores diferentes. A localização dos círculos indica a interação das palavras-chaves em termos de coocorrências, nas quais as palavras-chaves mais relacionadas são indicadas com círculos mais próximos. IFC, *framework*, *design*, BIM, *infrastructure*, *system*, *construction* e *cost estimate* têm maior relação, pois estão próximos um dos outros. *Automated information* está próximo de NPL e *semantic systems*. Tudo isso indica assuntos mais relacionados entre eles.

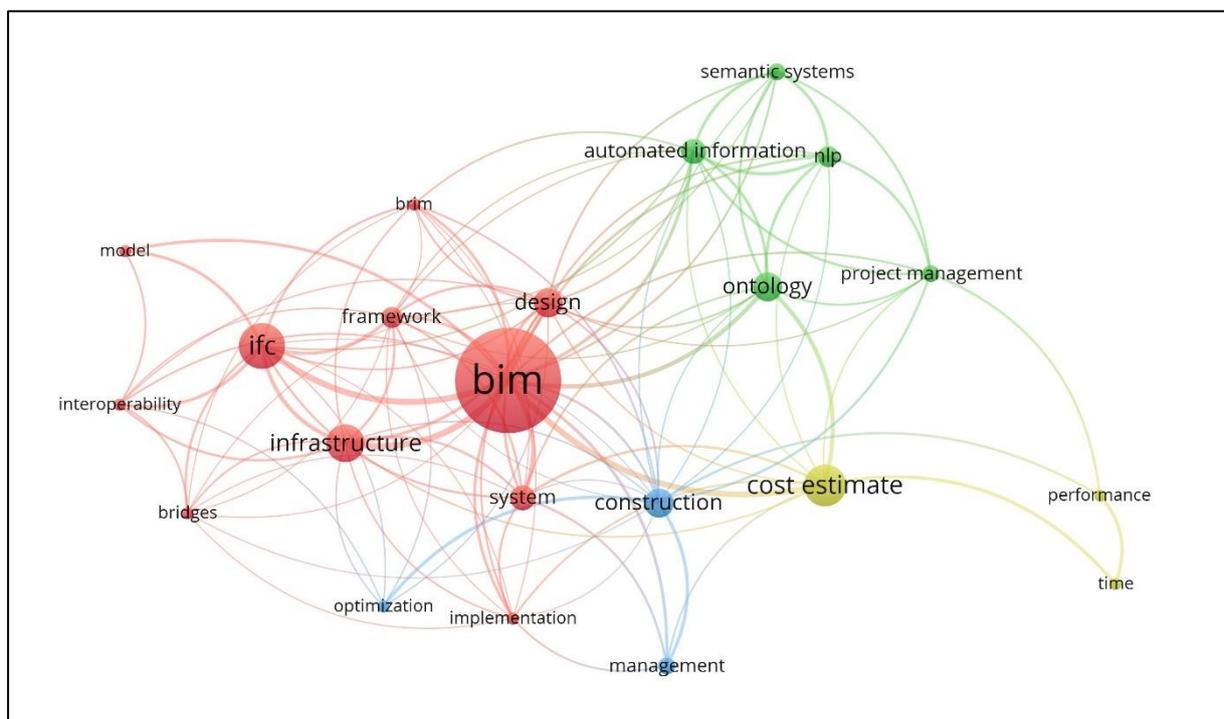


Figura 17 – Mapa de coocorrência de todas as palavras-chaves

Se a relação entre as palavras-chaves for alta, as linhas coloridas são mais grossas em largura. Na Figura 17, o termo BIM possui as linhas mais grossas na ligação com *infrastructure*, *system*, *cost estimate* e IFC, o que indica forte interação entre esses assuntos.

Quanto à cronologia das palavras-chaves, observou-se que as informações mais recentes são IFC, *model*, *interoperability*, *infrastructure*, *optimazation*, *framework*, *design*, BRIM e BIM, sendo que elas variam de 2019 a 2023. Já as palavras-chaves recentes *time* e *performance* estão ligadas às palavras-chaves de 2018, que são *cost estimate*, *constrution* e *project management*. *Ontology* é um dos termos mais antigos, mas há relação com BIM e *cost estimate*.

Desse modo, é possível interpretar que as palavras-chaves utilizadas na pesquisa na *Web of Science* apresentam interações, o que torna um estudo com conteúdo de coerência. Além disso, pelos dados de publicações dos últimos anos esses assuntos tem sido mais pesquisados de maneira a evoluir a automação de informações para estimativa de custo de projeto de infraestrutura ferroviária utilizando o BIM.

## 4.2 VALIDAÇÃO POR MEIO DO ESTUDO DE CASO

### 4.2.1 Script 1

Para ter o produto final das planilhas, foi necessário seguir um fluxo sequencial de informações entre os nós do Dynamo. Destaca-se que para isso, obteve-se os dados de entrada da rotina e depois o estaqueamento das seções ordenadas com a identificação se é corte ou aterro, que utilizou-se os nós: *Code Block*, *Python Script*, *List.GetItemAtIndex*.

Em seguida, foi essencial obter as cotas das superfícies do greide e topografia, para encontrar os pontos de passagens de corte e aterro, de modo que a informação estivesse organizada em ordem crescente. Esse processo utilizou os seguintes nós: *Alignment.CoordinateSystemByStationOffset*, *CoordinateSystem.Origin*, *List.Flatten*, *Point.X*, *Point.Y*, *Surface.ElevationByXY*, *Point.ByCoordinates*, *Code Block*, *PolyCurve.ByPoints*, *Geometry.IntersectAll*, *Alignment.StationOffsetByPoint*, *Range*.

Além disso, foi necessário obter as áreas e volumes de corte e aterro, assim como as distâncias entre as estacas, que utilizou o nós *List.GetItemAtIndex*, *List.Flatten*, *Python Script*, *Geometry.DistanceTo*.

Por fim, foi fundamental realizar uma programação visual para a criação de arquivos em Excel, com os dados que cada planilha deve conter. Para isso, utilizou-se os nós: *List.Flatten*, *Code Block*, *List.AddItemToFront*, *List Create*, *List.Transpose*, *List.Flatten*, *List.AddItemToFront*, *Python Script*, *Boolean*, *Document.Current*, *Document.Detail*, *String.Replace*, *String*, *String.Concat*, *ListAddItemToFront*, *Data.ExportToExcel*.

Dessa maneira, a VPL possibilitou ter a sequência lógica para resultar no produto com dados do projeto. Na Figura 18 apresenta o fluxograma da ideia de obtenção dos dados para realizar a distribuição de terraplenagem. A partir do modelo BIM foi inserida as informações de entrada do script para realizar os processamentos e associações de dados entre eles de acordo com o que cada planilha de resultado era necessário conter. Dessa maneira, a partir dos dados de entrada foi possível obter todos as outras informações do projeto em BIM.

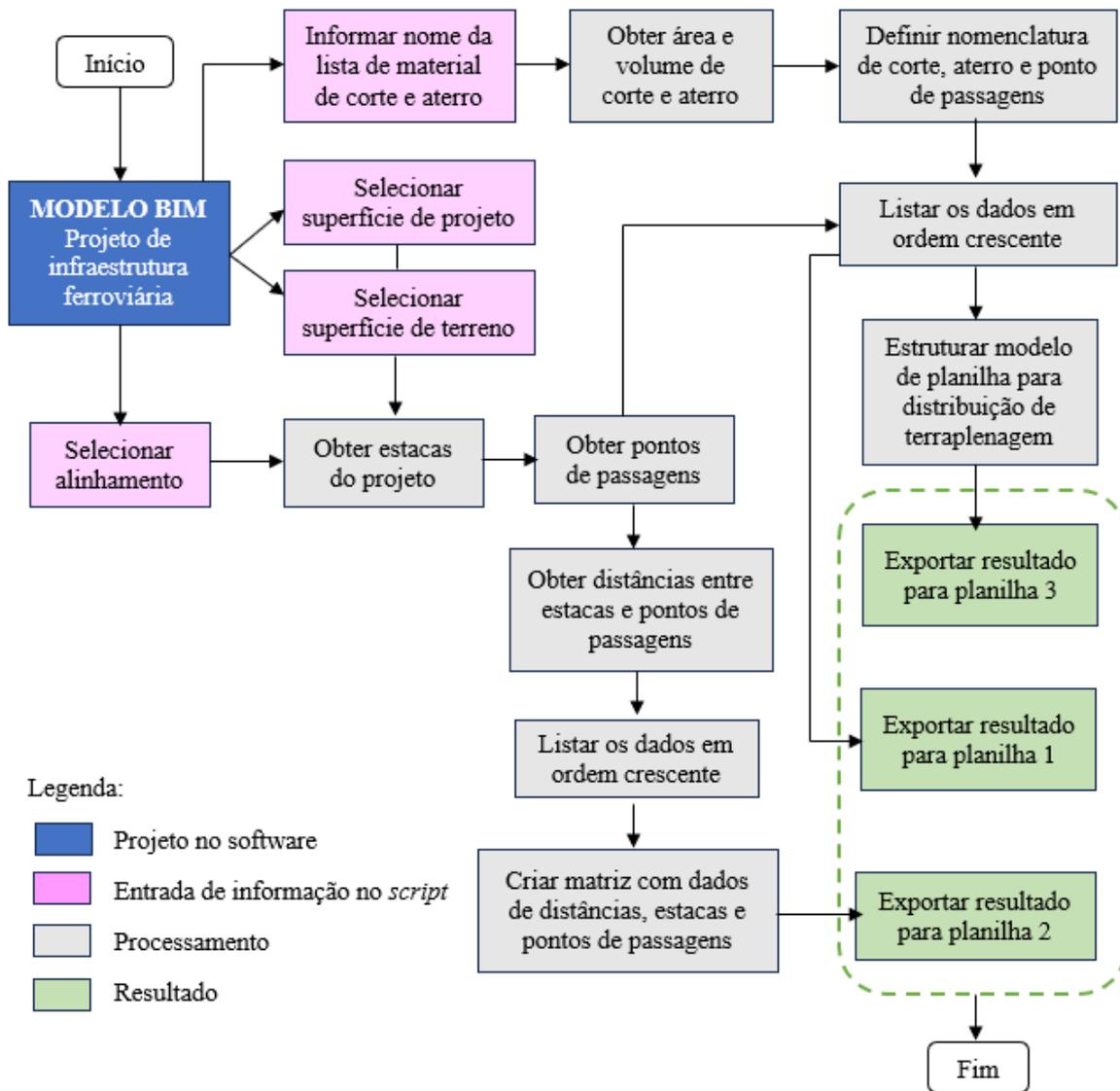


Figura 18 – Fluxograma do *script* 1 para obtenção das informações para distribuição de terraplenagem. Ressalta-se que foram utilizados nós python *script* para coletar e processar dados de áreas e volumes de corte e aterro. Na Figura 19 indica o bloco do código que informa a extração de áreas e volumes do projeto. As lógicas que utilizaram linguagem python era possível realizar com a utilização de vários nós do Dynamo, mas preferiu-se utilizar o nó python *script* para ter menos nós na rotina e ter maior organização visual.

```

for i in range(0, len(qtoSectionalResult)):
    aux_cut_ = []
    aux_fill_ = []
    aux_Volcut_ = []
    aux_Volfill_ = []
    for j in range(0, len(qtoSectionalResult[i])):
        aux_cut = []
        aux_fill = []
        aux_Volcut = []
        aux_Volfill = []
        for z in range(0, len(qtoSectionalResult[i][j])):
            Area = qtoSectionalResult[i][j][z].AreaResult
            Vol = qtoSectionalResult[i][j][z].VolumeResult
            aux_cut.append(Area.CutArea)
            aux_fill.append(Area.FillArea)
            aux_Volcut.append(Vol.IncrementalCutVolume)
            aux_Volfill.append(Vol.IncrementalFillVolume)
        aux_Volcut_.append(aux_Volcut)
        aux_Volfill_.append(aux_Volfill)
        aux_cut_.append(aux_cut)
        aux_fill_.append(aux_fill)
    CorteArea.append(aux_cut_)
    AterroArea.append(aux_fill_)
    VolumeCorte.append(aux_Volcut_)
    VolumeAterro.append(aux_Volfill_)
t.Commit()

```

Figura 19 – Bloco do código para extração de áreas e volumes do projeto

Portanto, para os dados de saída do *script* 1 foram construídos 3 nós de Data.ExportToExcel. Para a entrada de dados nesses nós foi necessário criar lógicas de elaboração do arquivo (Figura 20), apresentação dos dados de volume de terraplenagem do modelo (Figura 21), das distâncias de corte para aterro (Figura 22) e de distribuição de terra (Figura 23). Portanto, todo o processo com Dynamo foi automatizado e interativo com o modelo do projeto.

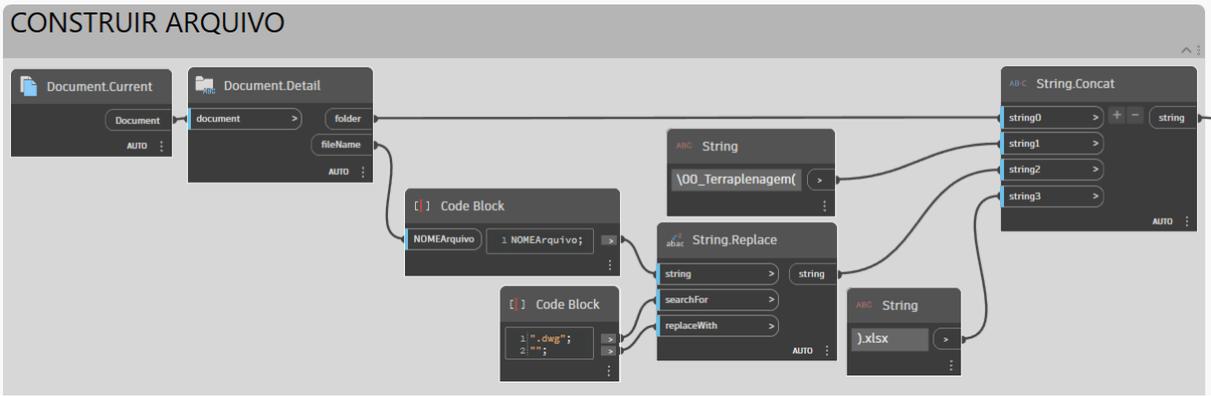


Figura 20 – Criação de arquivo

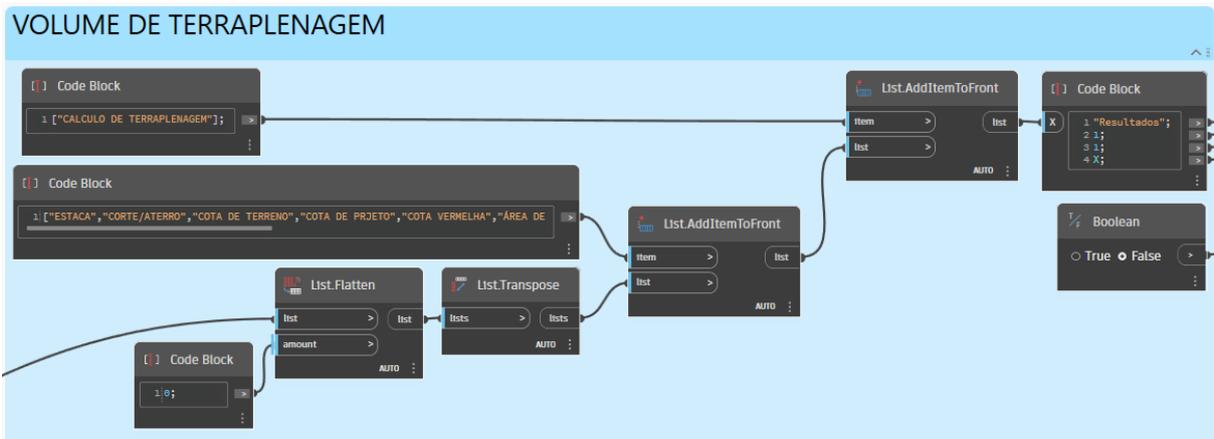


Figura 21 – Volume de terraplenagem

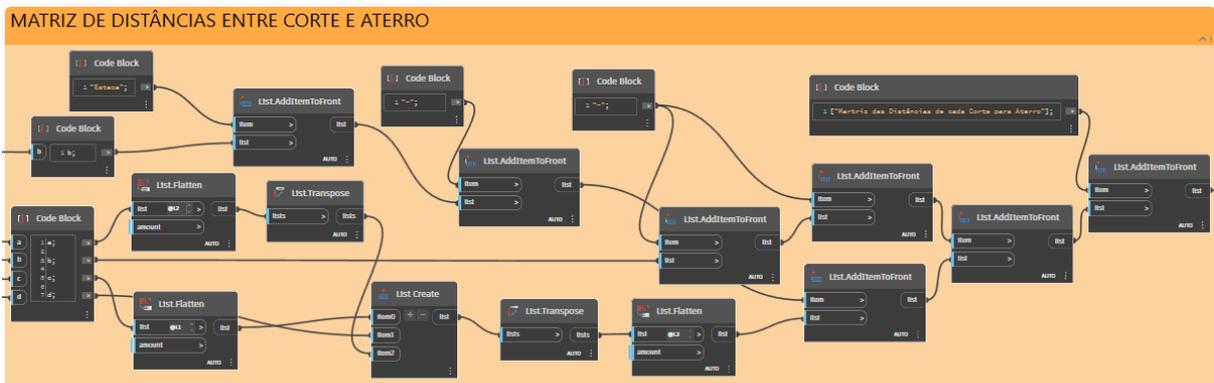


Figura 22 – Distâncias de corte para aterro

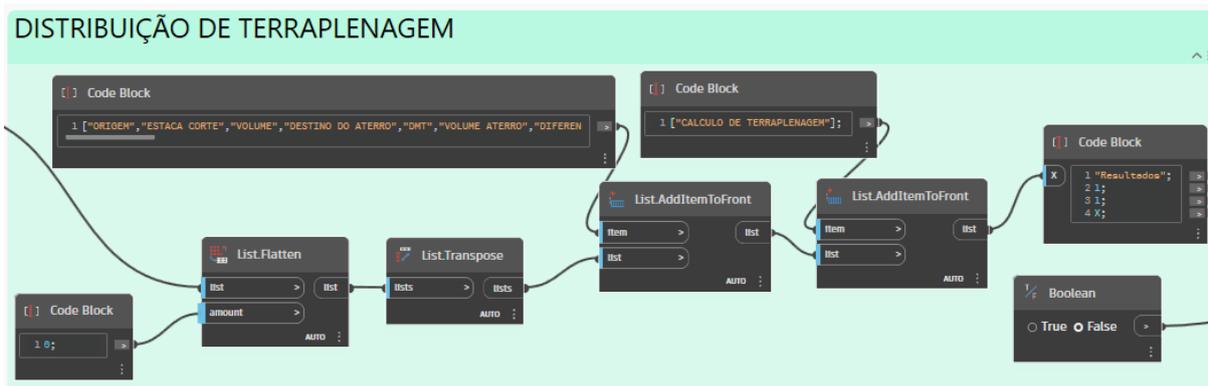


Figura 23 – Distribuição de terraplenagem

Desse modo, o *script 1* foi aplicado no estudo de caso do projeto de infraestrutura ferroviária, no entanto pode ser utilizado em qualquer projeto, desde que no modelo tenha as informações de entrada da rotina.

#### 4.2.2 Quantificação para serviços de estimativa de custos

O primeiro documento do resultado do *script 1* apresenta os dados de estacas, pontos de passagens (PP), indicação de estaca por corte (CO) ou aterro (AT) sequencialmente, cota do terreno, cota de projeto, cota vermelha, área de corte e aterro, volume de corte e aterro, como é visto por meio da Tabela 1, que exibe apenas o início dos dados, e por meio do Apêndice D, que apresenta o *link* para acessar a planilha completa.

Tabela 1 – Volume de terraplenagem

Estaca	Corte/Aterro	Cota de terreno	Cota de projeto	Cota vermelha	Área de corte	Área de aterro	Volume de corte	Volume de aterro
306860	AT 1	354,85	353,61	1,24	0,06	11,66	0,00	0,00
306880	AT 2	354,88	354,25	0,63	0,06	5,24	1,19	164,76
306900	AT 3	354,91	354,87	0,04	1,52	0,08	12,51	39,80
306901	PP-AT 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,52	0,08
306920	CO 1	354,93	355,50	-0,57	10,07	0,00	103,39	0,54
306940	CO 2	354,96	356,16	-1,20	19,03	0,00	286,31	0,00
306960	CO 3	354,99	356,96	-1,97	30,80	0,00	493,63	0,00

Estaca	Corte/Aterro	Cota de terreno	Cota de projeto	Cota vermelha	Área de corte	Área de aterro	Volume de corte	Volume de aterro
306980	CO 4	355,02	357,72	-2,70	43,25	0,00	737,01	0,00

(...)

O segundo documento apresenta uma matriz das distâncias, em metros, de cada corte para cada aterro, com as respectivas informações de estacas como é visto por meio da Tabela 2, que exhibe apenas o início dos dados, e por meio do Apêndice D, que apresenta o *link* para acessar a planilha completa.

Tabela 2 – Matriz de distância entre corte e aterro

-	-	CO 1	CO 2	CO 3	CO 4	CO 5	CO 6	CO 7
-	Estaca	306920	306940	306960	306980	307000	307020	307040
AT 3	306900	20,00002	40,00004	60,00006	80,00008	100,0001	120,0001	140,0001
AT 2	306880	40,00004	60,00006	80,00008	100,0001	120,0001	140,0001	160,0002
AT 1	306860	60,00006	80,00008	100,0001	120,0001	140,0001	160,0002	180,0002
AT 4	307560	639,7307	619,7338	599,7372	579,7407	559,7446	539,7487	519,7531
AT 5	307580	659,6596	639,6637	619,6681	599,6728	579,6778	559,6832	539,689
AT 6	307600	679,5778	659,5832	639,5888	619,5948	599,6013	579,6081	559,6155
AT 7	307620	699,485	679,4917	659,4988	639,5063	619,5144	599,523	579,5322

(...)

Para que o projetista faça a devida distribuição de corte e aterro adequada, o terceiro documento apresentou informações de origem e destino de solo, sendo que a origem informa os cortes com os dados de volumes de cada um. Já nas células em branco foi para o preenchimento manual do destino mais próximo com as respectivas informações de estaca, distância média, volume, saldo e verificação de sanar a demanda de solo, como é visto por meio da Tabela 3, que exhibe apenas o início dos dados.

Tabela 3 – Distribuição de terra com origem para destino, com compilação de dados

Origem	Corte	Volume (m³)	Destino mais próximo	Estaca	DMT (m)	Volume aterro (m³)	Diferença (m³)	Atendeu a demanda?
306901	PP-AT-CO 1	0						
306920	CO 1	103,39379						
306940	CO 2	286,31331						

(...)

Em vista que os resultados do *script* 1 foram 3 planilhas, então todas foram compiladas em um único arquivo, para facilitar a interoperabilidade de informações. No Apêndice D apresenta o *link* para acessar todas as planilhas completas, assim como a planilha com a compilação das 3 tabelas. Na Tabela 4 exibe o início da distribuição de terraplenagem com todos os dados correspondentes.

Tabela 4 – Distribuição de terra com origem para destino, com compilação de dados

Origem			Destino				
Corte	Volume (m³)	Volume homogeneizado (m³)	Aterro	DMT (m)	Volume aterro (m³)	Diferença (m³)	Atendeu a demanda?
CO 1	103,39	79,53	AT 3	10,00	39,80	39,73	YES
-	-	-	AT 2	20,00	164,7603542	-125,03	NO
CO 2	286,31	220,24	AT 2	20,00	-125,03	95,21	YES
-	-	-	AT 4	319,86	18,21781772	76,99	YES
-	-	-	AT 5	329,82	95,27229577	-18,28	NO
CO 3	493,63	379,72	AT 5	329,82	-18,28	361,44	YES

(...)

As informações na cor amarela da Tabela 4 são dados que o Dynamo exportou e na cor laranjada são os volumes homogeneizados, que foram acrescentadas na planilha para aprimoramento. No modelo do projeto não foi adicionado o fator de homogeneização, portanto foi necessário adequar o volume na planilha 3. Isso foi um resultado de ciclo da metodologia DSR, pois foi implementada uma possível solução que não foi validada, então foi necessário realizar um novo ciclo para sanar o problema.

As células nas colunas em branco são dados de destino de aterro que o projetista deve inserir manualmente. As células na cor azul são fórmulas que buscam informações, nos documentos 1 e 2, correspondentes ao aterro que o projetista escolheu.

Destaca-se que os dados de projeto e o fator de homogeneização de 30% foi aplicado para a quantificação de serviços de terraplenagem. Porém, não foram aplicados os requisitos do uso do solo devido à limitação de acesso de informação, mas é recomendável que seja utilizado, para condizer com a realidade *in loco*. Dependendo dos requisitos, pode ser necessário realizar empréstimos ou bota-fora.

Portanto, observou-se que, com a compilação dos resultados do *script 1*, o projetista tem todas as informações para realizar a distribuição de terra de corte para aterro mais próximo e assim, ter o quantitativo de volume de solo em cada classificação de DMT.

Nesse contexto, após a obtenção dos dados de volumes por DMT, em uma planilha de base de dados de estimativa de custo (Tabela 5) inseriu-se as informações de serviços do SICRO e os quantitativos dos serviços de escavação, carga e descarga de material de 1ª categoria de acordo com o DMT e do serviço de compactação de aterro 100% do proctor normal.

Tabela 5 – Base de dados de estimativa de custo

Descrição do serviço	Unid.	Base referencial	Código de Referência	Quant.	Custo unitário	Custo total	Data-base
Escavação, carga e transporte em material de 1ª categoria - DMT de 50 m	m³	SICRO	5501710	204,56	2,2	R\$ 450,04	out/21
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT de 50	m³	SICRO	5502109	0,00	4,51	-	out/21

<b>Descrição do serviço</b>	<b>Unid.</b>	<b>Base referencial</b>	<b>Código de Referência</b>	<b>Quant.</b>	<b>Custo unitário</b>	<b>Custo total</b>	<b>Data-base</b>
a 200 m - caminho de serviço em leito natural - com escavadeira e caminhão basculante de 14 m <sup>3</sup>							
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT de 200 a 400 m - caminho de serviço em leito natural - com escavadeira e caminhão basculante de 14 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	SICRO	5502110	5.010,91	4,82	R\$ 24.152,58	out/21
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT de 400 a 600 m - caminho de serviço em leito natural - com escavadeira e caminhão basculante de 14 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	SICRO	5502111	14.816,52	5,1	R\$ 75.564,23	out/21
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT de 600 a 800 m - caminho de serviço em leito natural - com escavadeira e caminhão basculante de 14 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	SICRO	5502112	1.352,31	5,63	R\$ 7.613,48	out/21
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT de 800 a 1.000 m - caminho de serviço em leito natural -	m <sup>3</sup>	SICRO	5502113	1.479,63	5,84	R\$ 8.641,01	out/21

Descrição do serviço	Unid.	Base referencial	Código de Referência	Quant.	Custo unitário	Custo total	Data-base
com escavadeira e caminhão basculante de 14 m <sup>3</sup>							
Compactação de aterros a 100% do proctor normal	m <sup>3</sup>	SICRO	5502978	22863,92	3,85	R\$ 19.691.749,08	out/21

Além disso, observa-se que nesse estudo foi definido um banco de dados de estimativa de custo para a aplicar essas informações nas propriedades dos elementos do projeto. Este banco de dados utilizou apenas composições do SICRO, informando o código e data-base, e isto foi realizado para manter a padronização. É visto pelo artigo de Häußler e Borrmann (2020) que essa situação é viável, pois eles afirmaram que é importante definir regras de custeio separadas por item e por unidade, por meio de um banco de dados de regras, pois é necessário validar os preços unitários de cada serviço. Um item pode ter vários preços unitários diferentes dependendo da unidade.

No que se refere ao levantamento de quantitativos, existem diferentes maneiras para calcular esses volumes de serviços de terraplenagem e ressalta-se que nesse estudo foi priorizado a menor distância média de transporte para ter o menor custo, pois o DMT está diretamente relacionado ao custo.

Este estudo utilizou o método trapezoidal para cálculo do volume ocupado e com seções a cada 20 metros ou distâncias médias dos pontos de passagens de corte para aterro ou vice-versa. Babapour *et al.* (2018) aplicaram um segmento semelhante, mas utilizou a área, aplicando o método heurístico empregando propriedades de inclinação do terreno.

Existem diferentes cenários de distribuição de terra para realizar comparações de custos-benefícios. Assim, o método DSR favoreceu nessa pesquisa para buscar uma solução viável e não uma ótima. Nesse estudo utilizou-se a ideia utilizar o solo do corte no aterro mais próximo, mas poderia utilizar um conjunto de cortes para um conjunto de aterros ou até especificar um limite máximo de DMT e assim, tomadas de decisões com diferentes estimativas de custos. Burdett and Kozan (2014) consideraram um terreno em constante mudança, calculando rotas de transporte de forma dinâmica. Os autores indicaram que os custos de transporte dessa maneira se tornam mais realistas para o processo de tomada de decisão.

### 4.2.3 Automação de estimativa de custos

O *script 2* apresentou uma lógica com a linguagem de programação visual para a atribuição de estimativa de custo no corredor do projeto. A Figura 24 apresenta o fluxograma da ideia para obtenção de dados a partir do projeto em BIM e importação do arquivo da base de dados da estimativa de custo, para processar e compatibilizar dados com o *property set* do corredor e por fim, atribuir todas as informações de estimativa de custo no corredor do projeto em BIM.

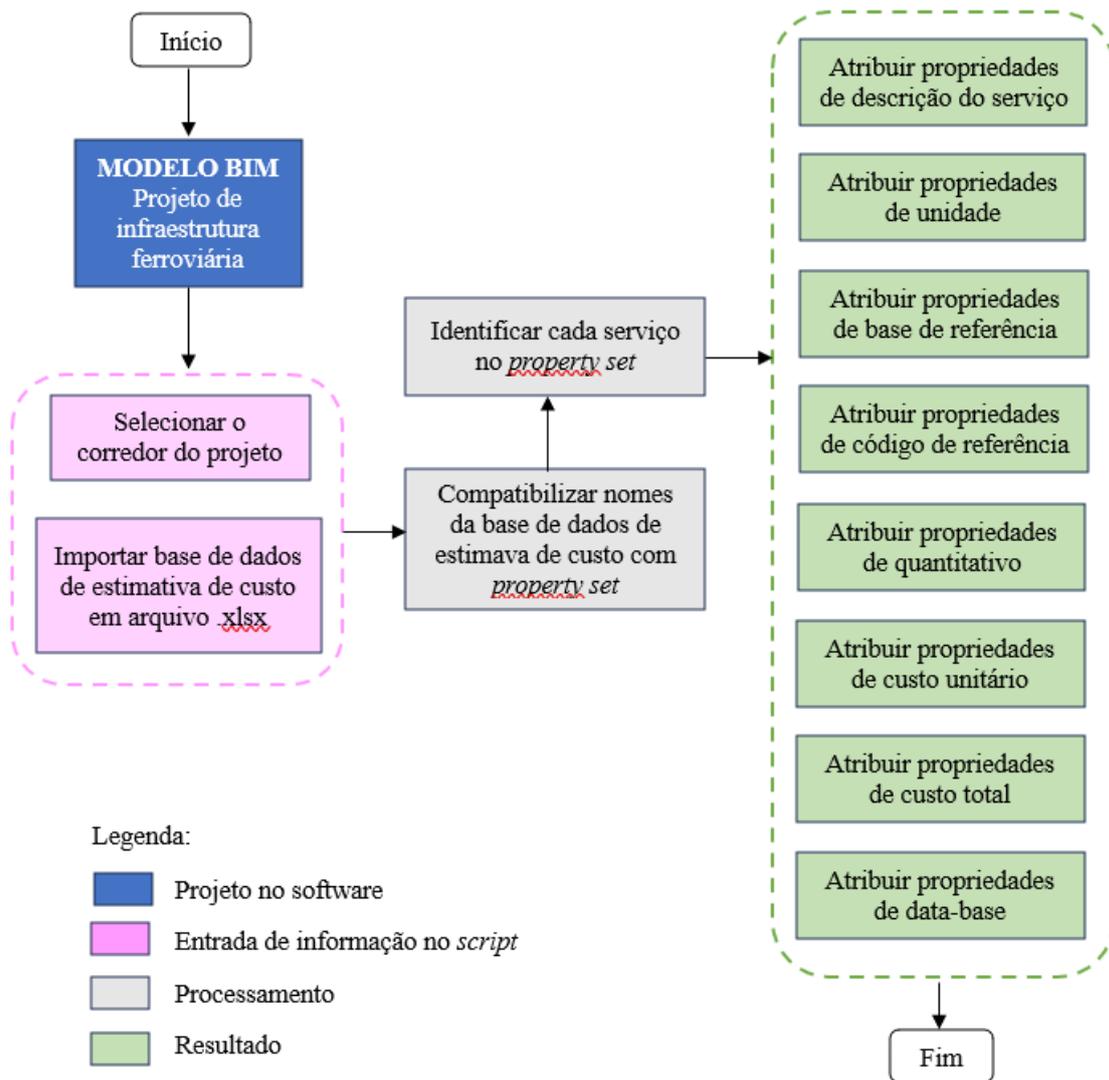


Figura 24 – Fluxograma do *script 2* para aplicação da estimativa de custo

Dessa maneira, utilizou-se importação de informações da base dados com os nós *File Path*, *File From Path*, *File Name*, *Code Block* e *Data.ImportExcel* (Figura 25).

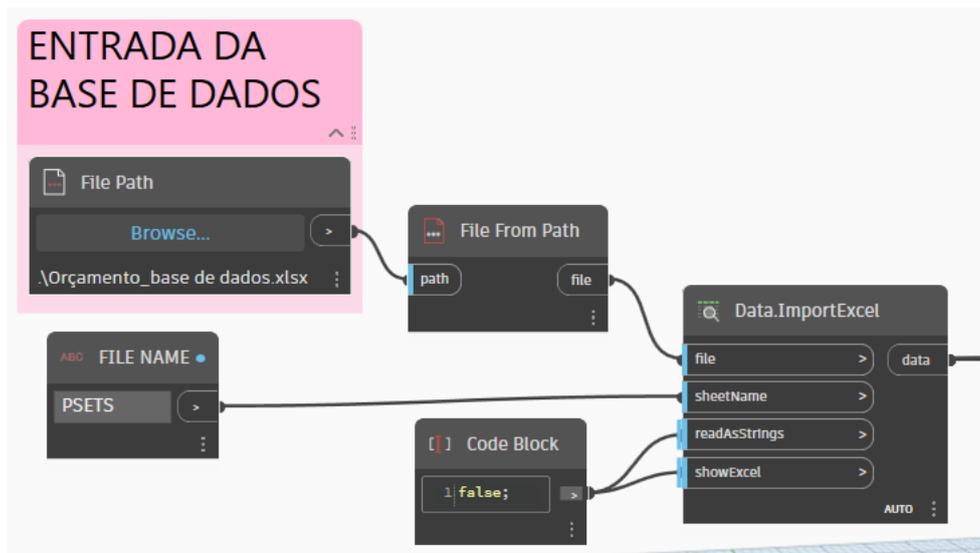


Figura 25 – Principais nós de entrada do *script 2*

Em seguida, foi realizada conexões dos dados da planilha com os nomes das propriedades, com os nós *Code Block*, *List.GetItemAtIndex*, *String from Object* e *Object.UpdateProperty*. Na primeira tentativa de execução da rotina, observou-se um impedimento, pois o nome do *property set* não estava igual ao da planilha de base de dados. Ao realizar o metodologia DSR nessa aplicação, então identificou-se o erro e realizou-se a adequação para solucionar o problema. Portanto, a rotina funciona apenas se os nomes das propriedades do modelo forem iguais ao da base de dados. Na Figura 26 apresenta os nomes utilizados no *Code Block* para ter a interoperabilidade no sistema.

```

[ ] Code Block
-----
1 "CalculoTerraplanagem";
2 "1 ESCAVACAO CARGA E TRANSPORTE 1ª CATEGORIA - DMT DE 0 A 50 M";
3 lista;
4 "1.1 DESCRIÇÃO DO SERVIÇO";
5 listaB;
6 "1.2 UNIDADE";
7 listaC;
8 "1.3 BASE REFERENCIAL";
9 listaD;
10 "1.4 CÓD. REFERÊNCIA";
11 listaE;
12 "1.5 QUANTIDADE";
13 listaF;
14 "1.6 CUSTO UNIT. (R$)";
15 listaG;
16 "1.7 CUSTO TOTAL (R$)";
17 listaH;
18 "1.8 DATA BASE";
19 listaI;

```

Figura 26 – Nó *Code Block*, do *script 2*, com os nomes das propriedades

O último nó, *Object.UpdateProperty*, foi utilizado para o preenchimento de informação de cada nome do *property set*. Então, para cada serviço foi necessário utilizar 9 nós (Figura 27).

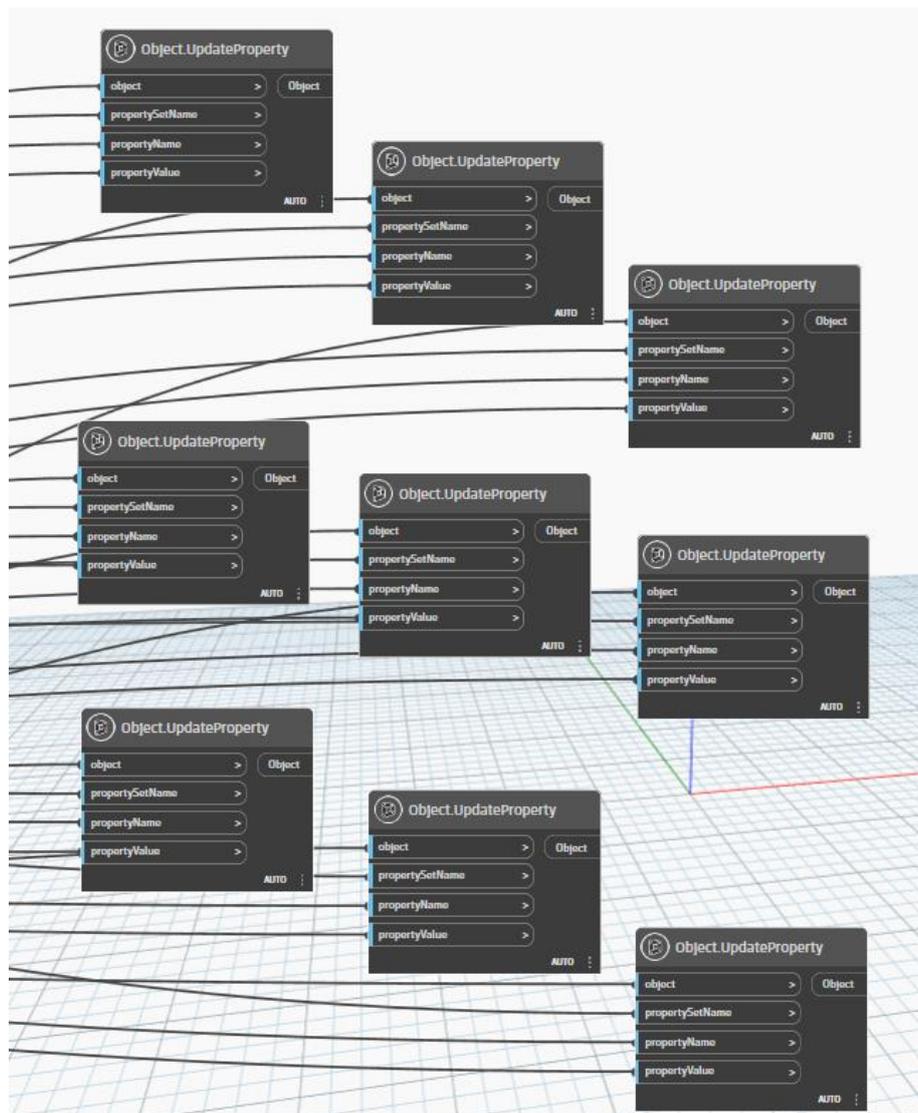


Figura 27 – Principais nós de saída do script 2

Destaca-se que essa rotina é executável em qualquer projeto, desde que apresente as informações de entrada e já tenha a configuração do *property set* no modelo. Além disso, cabe ressaltar que deve-se manter os mesmos nomes da estimativa de custos, a fim de não ocorrer incompatibilidades de informações.

O resultado da rotina foi o preenchimento automatizado, no *property set* Cálculo de Terraplenagem (Figura 28), das informações de estimativa de custo dos serviços de terraplenagem. Todas as informações que apresentaram na base de dados de estimativa de custo foram atribuídas à propriedade do corredor de maneira automatizada. Visto isso, é importante citar que essa atividade poderia ser feita manualmente, mas o intuito foi reduzir processos manuais para maximizar a acurácia.



Figura 28 – Propriedades de estimativa de custo preenchidas automaticamente no corredor

Ao abrir o IFC do modelo estudado no Software Open IFC Viewer 24.12.0, as propriedades estavam apresentadas na entidade `IfcFacilityPartCommon` (Figura 29), esta entidade é um subtipo de `IfcProduct` ou `IfcTypeProduct` e, portanto, parte de cada subconjunto de esquema padronizado e nível de implementação (BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED, 2024).

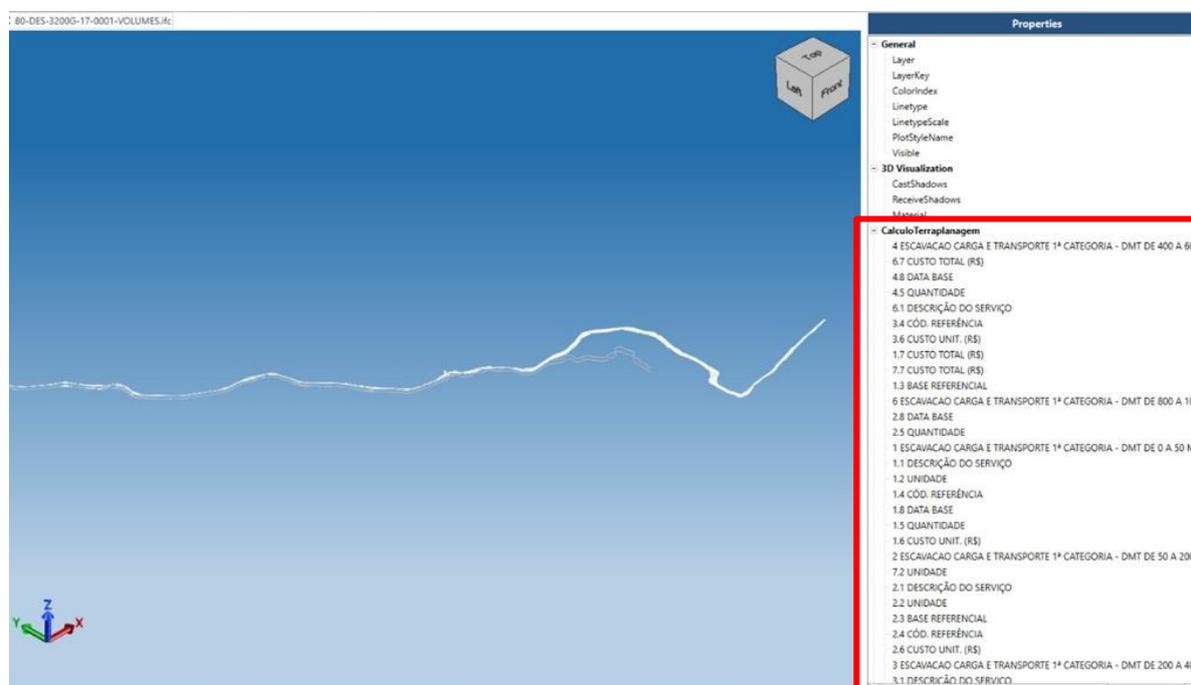


Figura 29 – Arquivo IFC no Open IFC Viewer com as propriedades da estimativa de custo

O arquivo `IFCInfraExportPropertyMapping` apresenta o nome da propriedade definida no arquivo IFC, o ativo dessa propriedade e o grupo (Figura 30). A estrutura do IFC foi visualizada

no software Visual Studio Code, que possui várias extensões desenvolvidas, especificamente para trabalhar com arquivos IFC.

```
583 "Name": "CalculoTerraplanagem",
584 "Description": "",
585 "TemplateType": "NOTDEFINED",
586 "ApplicableEntities": "IfcElement",
587 "PropertyTemplates": [
588 {
589   "Name": "1 ESCAVACAO CARGA E TRANSPORTE 1ª CATEGORIA - DMT DE 0 A 50 M",
590   "Description": "",
591   "PrimaryMeasureType": ""
592 },
593 {
594   "Name": "1.1 DESCRIÇÃO DO SERVIÇO",
595   "Description": "",
596   "PrimaryMeasureType": ""
597 },
598 {
599   "Name": "1.2 UNIDADE",
600   "Description": "",
601   "PrimaryMeasureType": ""
602 },
603 {
604   "Name": "1.3 BASE REFERENCIAL",
605   "Description": "",
606   "PrimaryMeasureType": ""
607 },
608 {
609   "Name": "1.4 CÔD. REFERENCIAL",
610   "Description": "",
611   "PrimaryMeasureType": ""
612 },

```

Figura 30 – FCInfraExportPropertyMapping com a propriedade do corredor

O esquema de dados do IFC é estruturado por códigos de informações. A estimativa de custo aplicada na propriedade do corredor do projeto ferroviário foi constatada no atributo `IfcPropertySingleValue`, que é relacionado com `IfcFacilityPartCommon`. A Figura 31 apresenta o IFC com o custo estimado dos serviços de distribuição de terra.

```
#646906= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('1.7 CUSTO TOTAL (R$)',$,IFCLABEL('450.04'),$);
#646907= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('2.7 CUSTO TOTAL (R$)',$,IFCLABEL('0.00'),$);
#646908= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('3.7 CUSTO TOTAL (R$)',$,IFCLABEL('24152.58'),$);
#646909= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('4.7 CUSTO TOTAL (R$)',$,IFCLABEL('75564.23'),$);
#646910= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('5.7 CUSTO TOTAL (R$)',$,IFCLABEL('7613.48'),$);
#646911= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('6.7 CUSTO TOTAL (R$)',$,IFCLABEL('8641.01'),$);
#646912= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('7.7 CUSTO TOTAL (R$)',$,IFCLABEL('19691749.08'),$);
```

Figura 31 – IFC com o custo estimado dos serviços de distribuição de terra

Reitera-se que `IfcPropertySingleValue` define um objeto de propriedade atribuída que possui um único valor, podendo ser numérico ou descritivo. Esses tipos de dados são podem ser atribuídos por diferentes representações e nesse estudo de caso a informação de valores foi no `IfcLabel`, que é uma *string* que representa o nome de algo interpretável e deve ter um significado em linguagem natural (BuildingSMART International Limited, 2024). Isso ocorreu devido a configuração de entrada de informações do tipo texto no *property set* do modelo.

Dessa maneira, entende-se que a propriedade de custo estimado tem uma herança de entidade. `IfcPropertySingleValue` e `IfcFacilityPartCommon` estão na mesma camada e apresentaram a

estimativa de custo, que pertence ao IfcFacilityPart, IfcSpatialStructureElement, IfcSpatialElement, IfcProduct, IfcObjectDefinition e IfcRoot. Na Figura 32 é exibida a hierarquia dessas entidades.

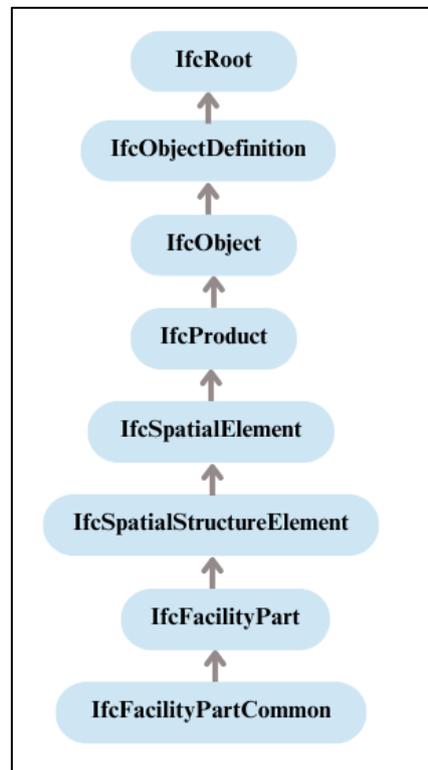


Figura 32 – Herança de entidade do IFC FacilityPartCommon (Adaptado de BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED, 2024)

Segundo a BuildingSMART International Limited (2024), cada entidade tem um significado e na Tabela 6 informa a representação de cada uma. Observa-se que para construir uma informação, é necessário ter uma estrutura lógica e organizada.

Tabela 6 – Definição de cada herança de entidade

Herança de entidade	Definição
IfcRoot	Classe mais abstrata e fundamental para todas as entidades dentro das especificações IFC, desde aquelas que têm origem no kernel até as camadas subsequentes. Todas as entidades que são subtipos de IfcRoot podem ser usadas de forma independente.
IfcObjectDefinition	Semanticamente representa qualquer entidade ou processo dentro do contexto da especificação IFC, podendo ser um tipo ou uma instância específica. Os objetos podem ser identificados por meio do atributo <i>Name</i> , que deve ser um rótulo compreensível para os usuários.
IfcProduct	Os produtos podem ser atribuídos a processos, controles, recursos, projetos por meio de objetos de relacionamento que se vinculam ao objeto correspondente.

Herança de entidade	Definição
IfcSpatialElement	A estrutura de projeto espacial define-se quantos níveis de decomposição forem necessários para o projeto. Para projetos de infraestrutura pode ser pontes, ferrovias, rodovias, portos, túneis e partes deles.
IfcSpatialStructureElement	Um elemento de estrutura espacial é uma generalização de todos os elementos espaciais que são empregados para estabelecer uma estrutura espacial. Essa estrutura pode ser utilizada para proporcionar uma organização espacial em um projeto.
IfcFacilityPart	Responsável por fornecer a divisão espacial de instalações construídas e pode ser ainda mais especializado de acordo com o tipo específico de instalação a ser subdividida.
IfcFacilityPartCommon	Conjuntos de propriedades que podem ser especificamente aplicáveis.

Assim, este estudo de caso foi utilizado o software Autodesk Civil 3D e Open IFC Viewer, mas pode-se utilizar outros disponíveis no mercado, desde que utilizem arquivos com formatos neutros e abertos para troca de informação. Nesse sentido, Fabozzi *et al.* (2021) utilizaram produtos Bentley no trabalho sobre uma abordagem baseada em BIM para a modelagem geotécnica e numérica da escavação de túneis.

Cabe ressaltar que o IFC permite uma extensão das informações, o que favorece ao projetista de ter a interoperabilidade, padrões abertos e neutros, confiabilidade, colaboratividade e flexibilidade. Zhou *et al.*, (2018) analisaram a modificação e o aprimoramento dos padrões da IFC para túneis de blindagem, uma abordagem comum para escavação de túneis subterrâneos que ainda não é adequadamente representada pela IFC. Wu *et al.* (2021) resolveram o problema de inconsistência de dados padrões. Eles adotaram um método de estender a entidade IFC para descrever objetos de engenharia geotécnica, como modelo de estrutura geológica a fim de ter informações no arquivo. Nesse sentido, pode-se observar que no desenvolvimento do estudo de caso em questão não foi necessário realizar extensão de informações, pois a estimativa de custo foi apresentada no arquivo.

Para a quantificação de serviços de terraplenagem foi utilizada a linguagem de programação visual para obter maior acurácia de dados e a aplicação da estimativa de custo nas propriedades do projeto. Além disso, VPL desenvolvida nas duas rotinas no Dynamo reduziu o tempo necessário para determinados processos que são vitais e propensos a erros. Assim, a automatização dos dados do projeto foi essencial para manter a atualização, precisão e confiabilidade de dados. Shah (2014) também desenvolveu um algoritmo para automatizar

processos de terraplenagem, incorporando dados de projeto de estradas, quantidades seccionais, taxas de produtividade variáveis e distância de transporte. Com esses dados, a ferramenta tornou-se de apoio à decisão que auxilia no planejamento de recursos.

Portanto, vários autores também utilizaram a linguagem de programação para aplicação em projetos em BIM e todos comprovaram a eficácia de rapidez, precisão, confiabilidade e interoperabilidade de informações.

#### 4.2.4 Software de orçamentação

Os softwares de orçamentação que utilizam o padrão IFC 4x3 em projetos de infraestrutura de transportes pode trazer benefícios significativos em termos de interoperabilidade, análise de custos e gestão de ativos em projetos de engenharia de transporte. Em vista que este estudo foi elaborado apenas a estimativa de custo e não um orçamento, o uso de software de orçamentação é um complemento final para ter o valor da obra do projeto.

Nesse sentido, o IFC apenas do corredor desse estudo de caso foi aplicado no software PriMus-IFC BIM, versão gratuita, e obteve-se êxito, pois o programa apresentou as entidades, especialmente a *IfcRoadPart* (Figura 33) com a propriedade da estimativa de custo dos serviços de distribuição de terraplenagem (Figura 34).

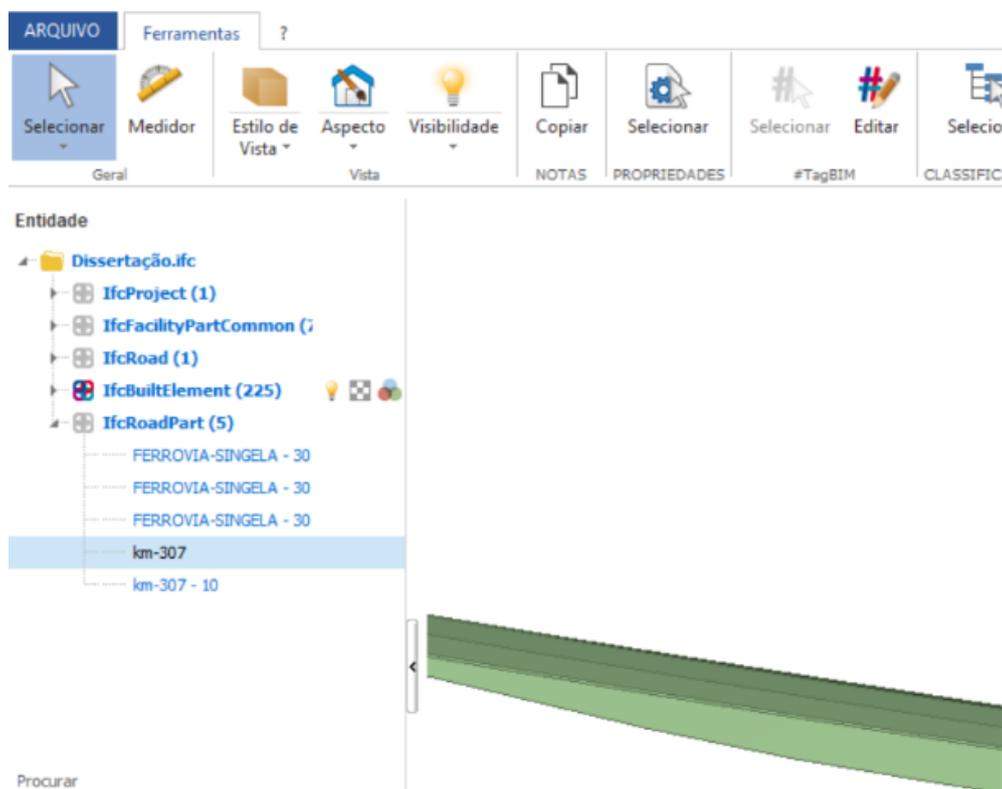


Figura 33 – Estrutura IFC com a entidade *IfcRoadPart*

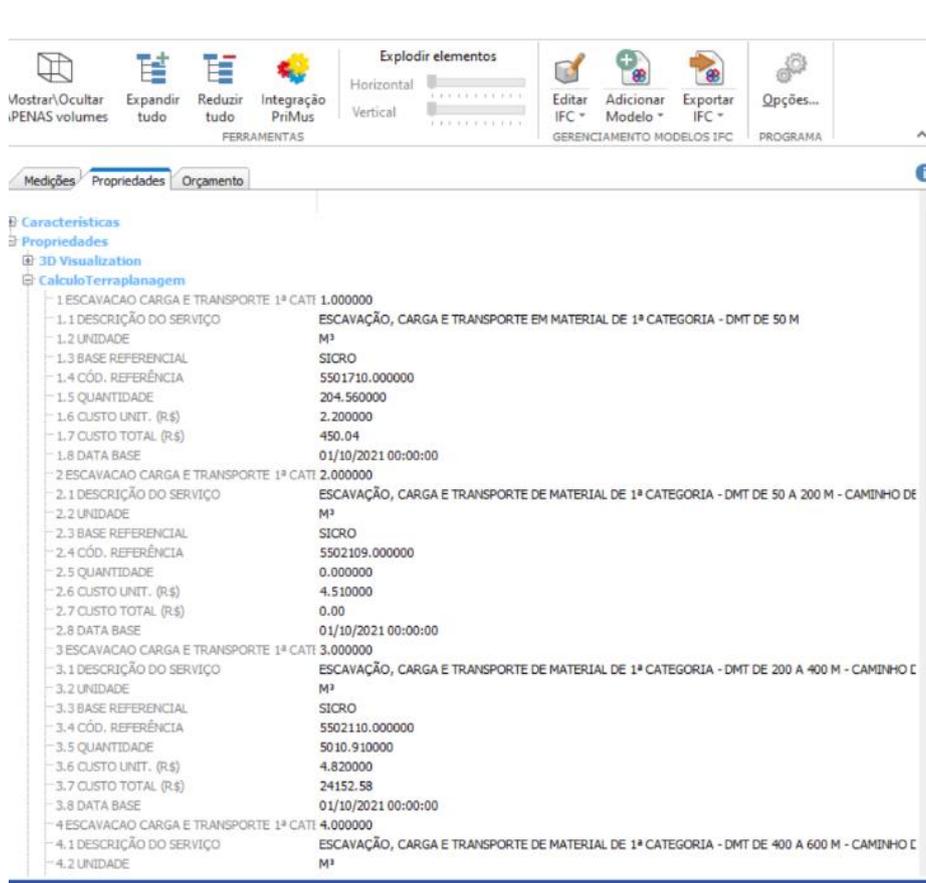


Figura 34 – IFCRoadPart com a propriedade da estimativa de custo dos serviços de distribuição de terraplanagem

Destaca-se que a entidade IFCRoadPart está na mesma camada do IFCFacilityPartCommon, o que indica a mesma herança de entidade. Além disso, observou-se que a base de dados SICRO apresenta CPU em documento .xml, mas no software PriMus-IFC BIM não abre documento nesse formato. Então, um IFC com CPU de estimativa de custo pode beneficiar o projetista por ter essas informações e, conseqüentemente, melhores análises. Portanto, o estudo de caso foi validado qualitativamente com o software de orçamentação.

### 4.3 VALIDAÇÃO POR MEIO DE ENTREVISTAS

Foram coletadas as respostas das entrevistas com 12 profissionais de diferentes empresas. Observou-se que 33% tinham experiência profissional na faixa de 6 a 15 anos. Outra característica foi que, aproximadamente, 60% dos profissionais afirmaram serem pós-graduados.

Os entrevistados avaliaram a eficácia da aplicação da metodologia e resultados desse estudo. Na Tabela 7 apresenta a escala Likert das respostas dos questionamentos, com níveis de muito difícil (1), difícil (2), neutro (3), fácil (4) e muito fácil (5), além das respectivas médias.

Tabela 7 – Quantidade de avaliações por nível e as respectivas médias dos resultados das perguntas das entrevistas

Questões	Muito difícil	Difícil	Neutro	Fácil	Muito fácil	$\mu$
1. É fácil utilizar o processo da metodologia?	0	1	0	5	6	4,33
2. A alimentação de dados nas rotinas do Dynamo pode ser preenchida com facilidade?	0	0	2	3	7	4,42
3. É fácil a utilização da planilha 1, que apresenta os dados de volumes das áreas das estacas e dos pontos de intersecções de corte para aterro ou vice-versa?	0	0	1	4	7	4,50
4. É fácil a consulta e análise da planilha 2, que apresenta as distâncias de cada corte para cada aterro?	0	0	0	3	9	4,75
5. É fácil a utilização e análise da planilha 3, que é para distribuição de terra de corte para aterro?	0	1	2	4	5	4,08
6. É fácil inserir e exportar para o IFC as informações nas propriedades do modelo com os dados de estimativa de custo de escavação, carga e transporte de acordo com a Distância Média de Transporte (DMT)?	1	0	0	5	6	4,25

Observa-se que houve predominância no nível de facilidade em utilizar esse método automatizado para levantamento de quantitativos de serviços de terraplenagem e aplicação da estimativa de custo na propriedade do corredor do projeto ferroviário. Além disso, cabe mencionar que 91,7% dos entrevistados já utilizaram a metodologia BIM em um projeto, 66,7% aplicaram alguma linguagem de programação no trabalho, 16,7% utilizaram a linguagem de programação para fazer distribuição de terra e ter uma estimativa de custo no IFC de um projeto e por fim, todos os entrevistados gostariam de aplicar a rotina Dynamo para extração de dados de maneira automatizada.

Durante as entrevistas, os profissionais da área de terraplenagem compartilharam experiências sobre a distribuição de terraplenagem e informaram que utilizam o Excel e o Civil 3D para determinar o quantitativo dos serviços utilizados nessa pesquisa. Portanto, todos os entrevistados ficaram interessados em utilizar o Dynamo, além de destacarem que qualquer profissional tem o livre acesso desse plugin.

Observou-se que por mais que tenha entrevista com profissionais *BIM Manager*, a maioria dos entrevistados já aplicaram a metodologia BIM e linguagem de programação em trabalhos, o que indica o motivo de entretenimento sobre o assunto durante as entrevistas.

As dificuldades apontadas pelos profissionais foram manusear as atividades no Excel, compreensão técnica sobre terraplenagem, não ter a prática da metodologia para ter maior compreensão, não saber exportar o IFC 4x3 no Civil 3D. Em vista disso, observa-se que essas dificuldades podem ser sanadas com a prática da metodologia, no entanto a distribuição de terra

é uma atividade que somente os profissionais que atuem na área de terraplenagem possuem maior facilidade de compreensão.

Por fim, como nos questionários havia um campo para observações a serem acrescentadas pelos entrevistados, eles fizeram contribuições para melhorar a análise de distribuição de terra, como:

- Aplicar vários cenários de distribuição de terra para que tenha situações comparativas, por exemplo, cenários de corte a cada 3km, 5km ou 10km.
- Realizar a distribuição de terra com informações de compensação lateral, camada final de aterro, alargamento, solo da drenagem;
- Utilizar todas as informações possíveis da equipe de geotecnia;
- Automatizar o processo manual realizado no Excel.

Entende-se que as contribuições dos entrevistados são referentes às várias hipóteses, que variam de acordo com os requisitos do projeto, que podem ser diferentes do apresentado nesse estudo de caso. Além disso, é nítido que para ter a análise automatizada para diferentes cenários de distribuição de terra necessita-se da aplicação do método *machine learning*, que realiza o treinamento da máquina para escolher a melhor situação. Contudo, como os dados são automatizados para serem exportados para planilha no Excel, é possível que o profissional trabalhe com esses dados em planilhas ou outro meio, pois para todas distribuições de terra serão utilizados os dados que foram extraídos no *script* 1.

Reitera-se que não houve dificuldades ou contribuições quanto aos processos automatizados e utilização da base de dados de estimativa de custo, com exceção de um entrevistado. A maioria dos profissionais, independente da área de atuação, tiveram facilidade e certamente houve clareza e ótimo desempenho, em vista dos anos de prática e experiência profissional dos entrevistados.

## 5 CONCLUSÕES

Os projetos de infraestrutura que utilizam a metodologia BIM e automação de processos para a estimativa de custo são importantes nas tomadas de decisões para o gerenciamento de projetos. As informações contidas no IFC são fatores essenciais para aplicação do BIM em projetos de infraestrutura, para alcançar a interoperabilidade, padrões abertos, confiabilidade, colaboratividade, flexibilidade e sustentabilidade durante toda o desenvolvimento do projeto.

Nesse estudo foi aplicado o *script* 1 para obter os dados de projeto e realizar a distribuição de terraplenagem, a fim de identificar a quantificação de serviços. Além disso, foi elaborado o *script* 2 para automatizar a aplicação de estimativa de custo nas propriedades do corredor do modelo ferroviário. E ainda, foi apresentada e validada a informação no IFC com a estimativa de custo em software de orçamentação. Portanto, todo o processo da metodologia foi semiautomatizado, pois foi necessário trabalhar com planilhas, o que demandou processos manuais com a análise de projetista. Apesar disso, concluiu-se que todos os *scripts* automatizados podem ser utilizados em qualquer projeto.

No que tange à validação da metodologia e resultados desse estudo, cabe ressaltar que esse estudo foi considerado ratificado de acordo com as entrevistas realizadas com profissionais que atuam diretamente nas áreas de *BIM Manager*, orçamento, terraplenagem e geometria de projetos de infraestrutura. Portanto, as entrevistas foram essenciais para reforçar a eficácia da metodologia e resultados qualitativos obtidos.

Este estudo cumpriu com todos os objetivos e assim contribui cientificamente para uma melhor compreensão e desenvolvimentos de fluxos automatizados de informações de quantificação do serviço de terraplenagem para posterior estimativa de custos de projeto ferroviário utilizando o BIM. Além disso, destaca-se que na literatura científica não há trabalhos com a mesma metodologia, concluindo avanço na área de infraestrutura com a automação dos *scripts* a fim de facilitar nas estimativas de custos de terraplenagem.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar continuidade ao estudo iniciado nesta pesquisa, propõe alguns trabalhos que poderão ser desenvolvidos posteriormente:

- Realizar análises com a aplicação de linguagem de programação e inteligência artificial em projetos de infraestrutura em BIM, de maneira que não utilize planilhas para ter maior confiabilidade das informações;

- Utilizar duas ou mais bases de referências de custos, para abranger a possibilidade da melhor estimativa de custo em projetos de infraestrutura de transportes;
- Aplicar inteligência artificial para distribuição de terra, de modo que considere bota-fora e empréstimos;
- Utilizar linguagem de programação e inteligência artificial para terraplenagem de drenagens e obras de arte especiais e correntes;
- Analisar duas metodologias de distribuição de terra com a aplicação de linguagem de programação e inteligência artificial.
- Aplicar a ontologia na estimativa de custo de distribuição de terraplenagem.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, (ANTT). **Manual de Custos Referenciais Ferroviários**. 1ªed., 2019. v. Volume 9: Estudos Especiais-Tomo 2

AKANBI, Temitope; ZHANG, Jiansong. Design information extraction from construction specifications to support cost estimation. **Automation in Construction**, v. 131, p. 103835, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580521002867>. Acesso em: 3 jun. 2023.

AL-AIDROUS, Al-Hussein Mohammed Hassan *et al.* Critical factors influencing inventory and procurement system of infrastructure projects. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 28, n. 8, p. 634–645, 2022. Disponível em: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/JCEM/article/view/16681>. Acesso em: 6 jan. 2024.

BABAPOUR, Raziieh *et al.* New strategies for estimation of cut and fill areas in road design with different ground cross-section offsets. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 33, n. 2, p. 178–187, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02827581.2017.1338748>. Acesso em: 17 abr. 2024.

BARAKCHI, Moein; TORP, Olav; BELAY, Alemu Moges. Cost Estimation Methods for Transport Infrastructure: A Systematic Literature Review. **Procedia Engineering**, v. 196, p. 270–277, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817330588>. Acesso em: 26 maio 2024.

BARROS, Laís Bandeira. **Aplicação de redes neurais artificiais no contexto de estimativa de custos de construção de rodovias**. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

BIANCARDO, Salvatore Antonio *et al.* Integration of BIM and Procedural Modeling Tools for Road Design. **Infrastructures**, v. 5, n. 4, p. 37, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2412-3811/5/4/37>. Acesso em: 6 jan. 2024.

BRASIL. **Decreto nº 7.983, de 8 de abril de 2013**. Estabelece regras e critérios para elaboração do orçamento de referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos dos orçamentos da União, e dá outras providências. 8 abr. 2013. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2013/decreto/d7983.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/decreto/d7983.htm).

BRASIL. **DECRETO Nº 10.306, DE 2 DE ABRIL DE 2020**. Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling - Estratégia BIM BR, instituída pelo Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. 2020.

BRASIL. **DECRETO Nº 11.888 DE 22 DE JANEIRO DE 2024**. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling no Brasil - Estratégia BIM BR e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling - BIM BR. 22 jan. 2024. Disponível em:

<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=11888&ano=2024&data=22/01/2024&ato=b63ITRE1ENZpWT83d>.

BRASIL. **LEI Nº 14.133, DE 1º DE ABRIL DE 2021**. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. 1 abr. 2021. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2021/lei/114133.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/114133.htm).

BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED. **IfcFacilityPartCommon.**, 2024. Disponível em: <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/lexical/IfcFacilityPartCommon.htm>. Acesso em: 14 maio 2024.

BURDETT, R.L.; KOZAN, E. An integrated approach for earthwork allocation, sequencing and routing. **European Journal of Operational Research**, v. 238, n. 3, p. 741–759, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221714003786>. Acesso em: 17 abr. 2024.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **SINAPI: metodologias e conceitos**. Caixa, 2015.

CASTELO, Francisco Wesley Paiva. **Projetos III: infraestruturas urbanas**. In: São Paulo: Senac, 2024.

COSTA, Abimael De Jesus Barros. **Inovação em governança regulatória proposta de modelo regulatory oversight aplicado à infraestrutura de transportes terrestres brasileira**. 2016. Doctorate - Universidade de Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/22395>. Acesso em: 13 maio 2024.

COSTIN, Aaron *et al.* Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. **Automation in Construction**, v. 94, p. 257–281, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580517309470>. Acesso em: 6 jan. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. 1ª Edição. Brasília: 2017. v. Volume 01- Metodologia e Conceitos

FABOZZI, Stefania *et al.* I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 108, p. 103723, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779820306775>. Acesso em: 17 abr. 2024.

FALCÃO, Viviane Adriano. **Modelo de roteirização para a terraplenagem em obras rodoviárias aplicando programação linear inteira**. Tese (doutorado), Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2016.

FALCÃO, Viviane Adriano; NOBRE JÚNIOR, Ernesto Ferreira; PRATA, Bruno De Athayde. Truck routing cut and fill problem in roadworks using integer programming. **TRANSPORTES**, v. 28, n. 5, p. 57–69, 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2032>. Acesso em: 13 maio 2024.

FELIX, Marcos Kleber Ribeiro. **Exploração de infraestrutura ferroviária : lições de extremos para o Brasil**. 2018. Master - Universidade de Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31557>. Acesso em: 13 maio 2024.

FERRONATO, Diogo. **BIM-based cost estimation at early stages based on historical data**. Universidade do Minho, 2020. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/74842>. Acesso em: 14 maio 2024.

HARE, Warren L.; KOCH, Valentin R.; LUCET, Yves. Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming. **European Journal of Operational Research**, v. 215, n. 2, p. 470–480, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221711005406>. Acesso em: 26 maio 2024.

HATAMLEH, Muhammad T. *et al.* Factors affecting the accuracy of cost estimate: case of Jordan. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 25, n. 1, p. 113–131, 2018. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-10-2016-0232/full/html>. Acesso em: 6 jan. 2024.

HÄUSSLER, Marco; BORRMANN, André. Model-based quality assurance in railway infrastructure planning. **Automation in Construction**, v. 109, p. 102971, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580519303279>. Acesso em: 6 jan. 2024.

HUANG, M.Q. *et al.* Multi-LOD BIM for underground metro station: Interoperability and design-to-design enhancement. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 119, p. 104232, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779821004235>. Acesso em: 6 jan. 2024.

HÜTHWOHL, Philipp *et al.* Integrating RC Bridge Defect Information into BIM Models. **Journal of Computing in Civil Engineering**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 04018013, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000744>. Acesso em: 6 jan. 2024.

IBRAHIM, Ahmed H; ELSHWADFY, Lamiaa M. Factors Affecting the Accuracy of Construction Project Cost Estimation in Egypt. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 15, n. 3, 2021.

INFRA S.A. **Estudos e Projetos Ferroviários**. 2024. Disponível em: <https://www.infrasa.gov.br/ferrovias-da-infra-s-a/estudos-e-projetos-ferroviarios/>. Acesso em: 12 jul. 2024.

INFRA S.A. **Norma REG-00041 - Manual BIM de Projetos Ferroviários da INFRA S.A.** 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. **Norma DNIT 106/2009 - ES: Terraplenagem - Aterros - Especificação de Serviço**. 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. **Norma DNIT 108/2009 - ES: Terraplenagem - Aterros - Especificação de Serviço**. 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering**

**works, including building information modelling (BIM) - Part 1: Concepts and principles.** 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema.** 2024.

KEBEDE, Rahel *et al.* Integration of manufacturers' product data in BIM platforms using semantic web technologies. **Automation in Construction**, v. 144, p. 104630, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580522005003>. Acesso em: 6 jan. 2024.

KENSEK, K. M. Integration of Environmental Sensors with BIM: case studies using Arduino, Dynamo, and the Revit API. **Informes de la Construcción**, v. 66, n. 536, p. e044, 2014. Disponível em: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/3575/4027>. Acesso em: 14 maio 2024.

KHAN, Numan *et al.* Excavation Safety Modeling Approach Using BIM and VPL. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, p. 1–15, 2019. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/1515808/>. Acesso em: 6 jan. 2024.

KIM, Hyunjoo *et al.* Developing a 3D intelligent object model for the application of construction planning/simulation in a highway project. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 2, p. 538–548, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12205-015-0463-4>. Acesso em: 17 abr. 2024.

LEE, Seulki; KIM, Karam; YU, Jungho. Ontological inference of work item based on BIM data. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 3, p. 538–549, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12205-013-0739-5>. Acesso em: 3 jun. 2023.

LEE, Jae Hyuk; PARK, Jeong Jun; YOON, Hyungchul. Automatic Bridge Design Parameter Extraction for Scan-to-BIM. **Applied Sciences**, v. 10, n. 20, p. 7346, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/20/7346>. Acesso em: 17 abr. 2024.

LI, Rui; ROBERTI, Roberto. Optimal Scheduling of Railway Track Possessions in Large-Scale Projects with Multiple Construction Works. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 6, p. 04017007, 2017. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001289>. Acesso em: 6 jan. 2024.

MARMO, Rossella *et al.* Building performance and maintenance information model based on IFC schema. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103275, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580520302181>. Acesso em: 6 jan. 2024.

MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamentos de obras.** 3<sup>a</sup>ed.: Oficina de Textos, 2019.

MENESES FILHO, Anísio de Sousa. **Temas de engenharia civil.** 7. ed. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2016.

MESHREF, Ahmed Nouh; ELKASABY, E. A.; WAGEH, Omnia. Innovative reliable approach for optimal selection for construction infrastructures projects delivery systems. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 5, n. 2, p. 56, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s41062-020-00307-w>. Acesso em: 6 jan. 2024.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Plano Nacional de Logística 2035**. 2022.

MOSELHI, O.; HASSANEIN, A. Optimized Scheduling of Linear Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 129, n. 6, p. 664–673, 2003. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9364%282003%29129%3A6%28664%29>. Acesso em: 14 maio 2024.

MURAMATSU, Roberta *et al.* Desafios para o Transporte Ferroviário de Carga no Brasil: Uma Análise Setorial Informada pela Nova Economia Institucional e Teoria da Escolha Pública. *In: Estudos Econômicos Setoriais: Máquinas e Equipamentos, Ferrovias, Têxtil e Calçados*: Editora Blucher, 2019. p. 59–128. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/article-details/03-21803>. Acesso em: 12 jul. 2024.

NORONHA, Francisco Arthur Alves; OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. **Avaliação de proposta de composição de custos unitários de serviços em vias não pavimentadas com base no sicro-3**. 2018.

OLIVEIRA, Natalia da Silva de. **Automatização da análise do desempenho termo energético das envoltórias de edificações residenciais a partir da integração BIM-VPL**. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2022. Dissertação de Mestrado.

PARK, Suyeul; KIM, Seok; SEO, Heechang. Study on Representative Parameters of Reverse Engineering for Maintenance of Ballasted Tracks. **Applied Sciences**, v. 12, n. 12, p. 5973, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/12/5973>. Acesso em: 17 abr. 2024.

PEREIRA, Djalma Martins *et al.* **Introdução à terraplenagem**. 2015.

RAICU, Serban *et al.* Including negative externalities during transport infrastructure construction in assessment of investment projects. **European Transport Research Review**, v. 11, n. 1, p. 24, 2019. Disponível em: <https://etr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-019-0361-9>. Acesso em: 6 jan. 2024.

RASHIDI, Abbas; KARAN, Ebrahim. Video to BrIM: Automated 3D As-Built Documentation of Bridges. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 32, n. 3, p. 04018026, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0001163>. Acesso em: 6 jan. 2024.

RUIZ-PADILLO, Alejandro *et al.* **Projeto de terraplenagem de rodovias**. Santa Maria, RS : UFSM, Centro de Tecnologia, Laboratório de Mobilidade e Logística: 2023.

SALZANO, Antonio *et al.* Systematic Literature Review of Open Infrastructure BIM. **Buildings**, v. 13, n. 7, p. 1593, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/7/1593>. Acesso em: 6 jan. 2024.

SHAH, Raj Kapur. A new approach for automation of location-based earthwork scheduling in road construction projects. **Automation in Construction**, v. 43, p. 156–169, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580514000557>. Acesso em: 17 abr. 2024.

SHARAFAT, Abubakar *et al.* BIM-Based Tunnel Information Modeling Framework for Visualization, Management, and Simulation of Drill-and-Blast Tunneling Projects. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 35, n. 2, p. 04020068, 2021. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000955>. Acesso em: 6 jan. 2024.

SILVA, Caio Sergio Parente. **Otimização da distribuição de materiais de terraplenagem utilizando programação linear com base em custos de transporte**. XXXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. 2021.

SOILÁN, Mario *et al.* Fully automated methodology for the delineation of railway lanes and the generation of IFC alignment models using 3D point cloud data. **Automation in Construction**, v. 126, p. 103684, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580521001357>. Acesso em: 6 jan. 2024.

TANG, Fanlong *et al.* Integrating three-dimensional road design and pavement structure analysis based on BIM. **Automation in Construction**, v. 113, p. 103152, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092658051930768X>. Acesso em: 17 abr. 2024.

TONG, Bin; GUO, Jingjuan; FANG, Shen. Predicting Budgetary Estimate of Highway Construction Projects in China Based on GRA-LASSO. **Journal of Management in Engineering**, v. 37, n. 3, p. 04021012, 2021. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0000890>. Acesso em: 6 jan. 2024.

VALEC. **Plano de Execução BIM da VALEC - Pos-contrato**. 2020. Disponível em: [https://www.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2023/07/026\\_2021\\_ANEXO\\_II\\_-\\_Plano\\_de\\_Execucao\\_BIM\\_da\\_VALEC\\_-\\_Pos-contrato-1.pdf](https://www.infrasa.gov.br/wp-content/uploads/2023/07/026_2021_ANEXO_II_-_Plano_de_Execucao_BIM_da_VALEC_-_Pos-contrato-1.pdf). Acesso em: 26 maio 2024.

VALINEJADSHOUBI, Mojtaba; BAGCHI, Ashutosh; MOSELHI, Osama. Development of a BIM-Based Data Management System for Structural Health Monitoring with Application to Modular Buildings: Case Study. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 33, n. 3, p. 05019003, 2019. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000826>. Acesso em: 14 maio 2024.

VAN AKEN, Joan; CHANDRASEKARAN, Aravind; HALMAN, Joop. Conducting and publishing design science research: Inaugural essay of the design science department of the Journal of Operations Management. **Journal of Operations Management**, v. 47–48, n. 1, p. 1–8, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1016/j.jom.2016.06.004>. Acesso em: 14 maio 2024.

VIGNEAULT, Marc-Antoine *et al.* An Innovative Framework of 5D BIM Solutions for Construction Cost Management: A Systematic Review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 27, n. 4, p. 1013–1030, 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11831-019-09341-z>. Acesso em: 14 maio 2024.

VITÁSEK, Stanislav; MATĚJKA, Petr. Utilization of BIM for automation of quantity takeoffs and cost estimation in transport infrastructure construction projects in the Czech Republic. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 236, p. 012110, 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/236/1/012110>. Acesso em: 7 jan. 2024.

WIERINGA, Roel. Design science as nested problem solving. *In*: THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE, 2009, Philadelphia, Pennsylvania. **Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology - DESRIST '09**. Philadelphia, Pennsylvania: ACM Press, 2009. p. 1. Disponível em: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1555619.1555630>. Acesso em: 14 maio 2024.

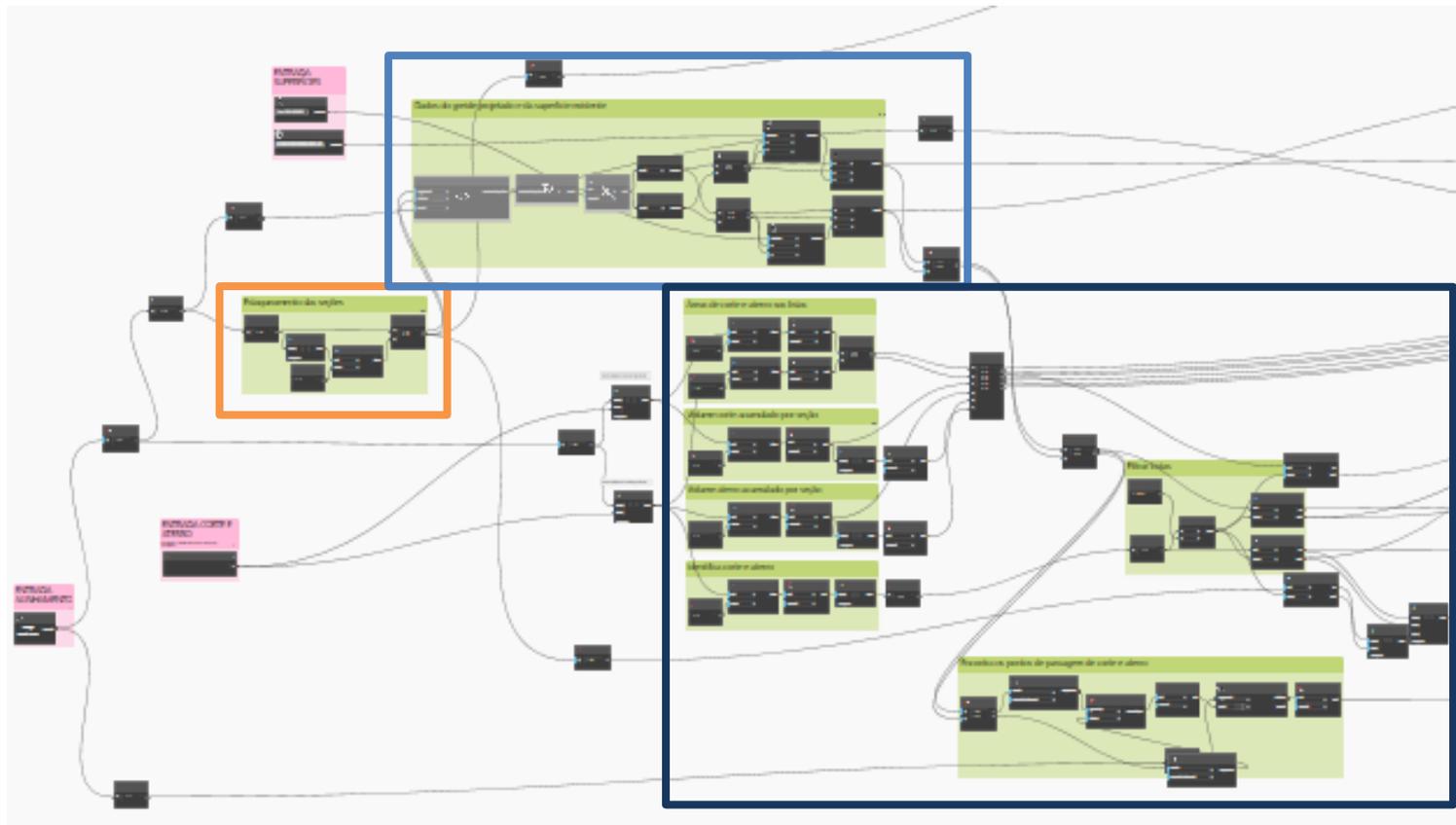
WU, Jiaming *et al.* Development of Data Integration and Sharing for Geotechnical Engineering Information Modeling Based on IFC. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2021/8884864/>. Acesso em: 6 jan. 2024.

ZHANG, Jiansong; EL-GOHARY, Nora M. Extending Building Information Models Semiautomatically Using Semantic Natural Language Processing Techniques. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 30, n. 5, p. C4016004, 2016. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000536>. Acesso em: 6 jan. 2024.

ZHOU, Ying *et al.* Utilizing IFC for shield segment assembly in underground tunneling. **Automation in Construction**, v. 93, p. 178–191, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580517309433>. Acesso em: 17 abr. 2024.

## APÊNDICE A – SCRIPT 1

- Primeira seção do *Script 1*

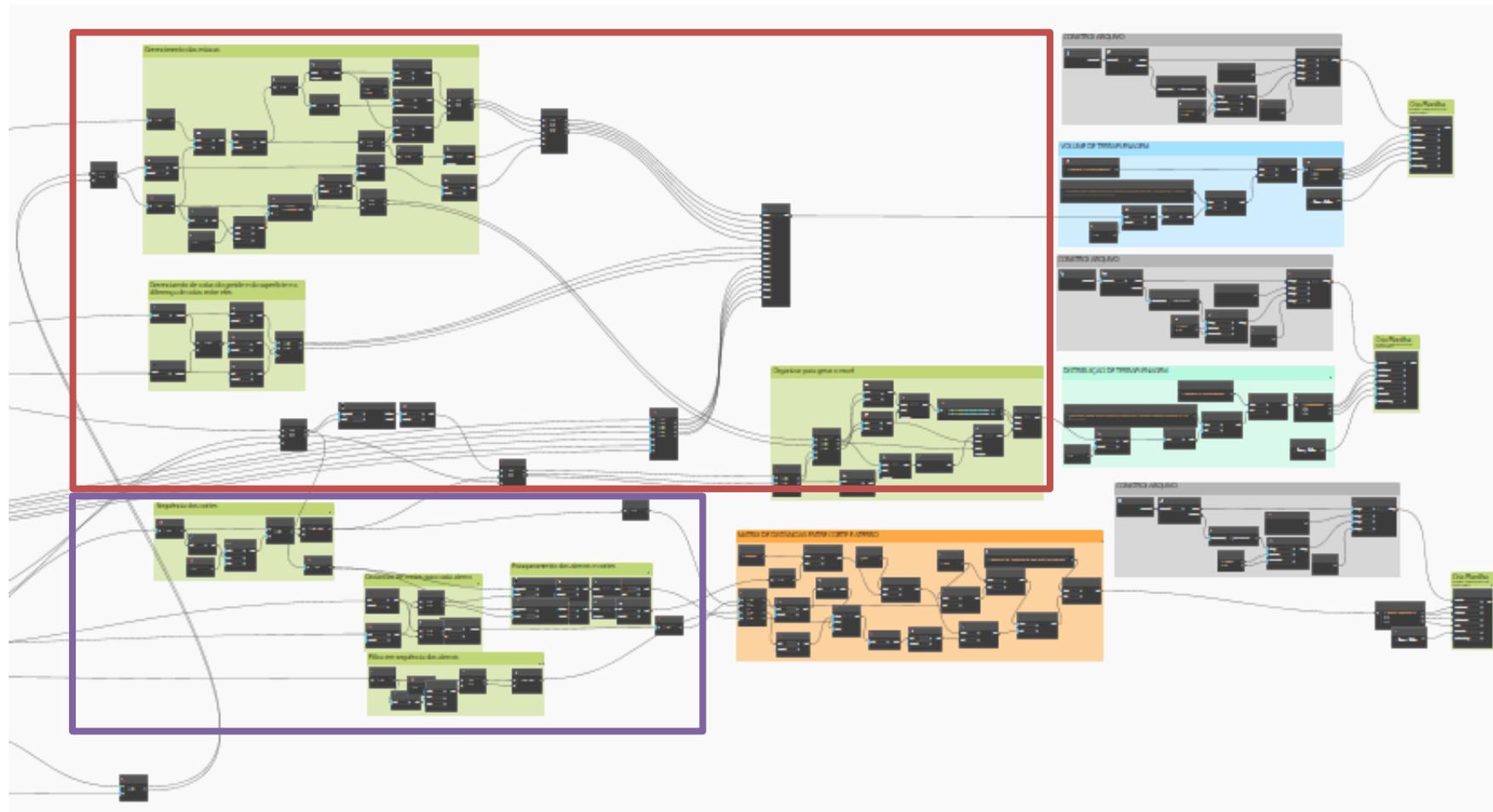


Fonte: A autora (2024)

Legenda:

Entrada de informações    Extração e processamento de dados do modelo    Estacas    Superfícies    Corte e Aterro

- Segunda seção do *Script 1*

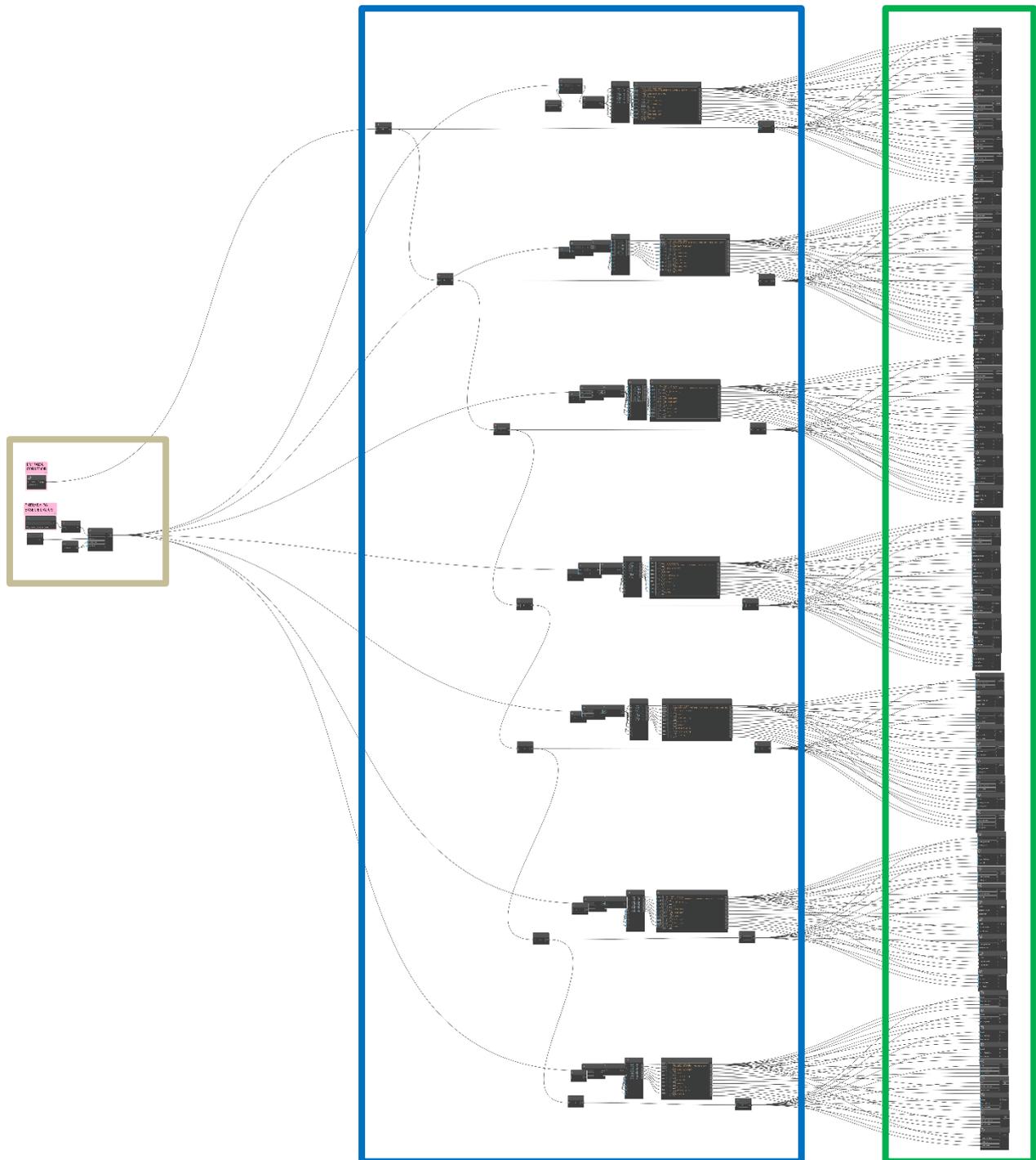


Fonte: A autora (2024)

Legenda:

Processamento de dados
  
 
 Matriz
  
 
 Volume
  
 
 Distribuição de terraplenagem
  
 
 Planilhas
  
 
 Gerenciamento
  
 
 DMT

## APÊNDICE B – SCRIPT 2



Fonte: A autora (2024)

Legenda:

- Entrada de informações
- Importação de dados
- Compatibilização de nomes
- Aplicação da informação na propriedade

## APÊNDICE C – FORMULÁRIO DE ENTREVISTA

### Seção 1: Perfil dos entrevistados

1. Qual o seu e-mail?
2. Qual a sua formação acadêmica?
3. Qual o seu nível de formação? Graduação completa, especialização completa, mestrado completo, doutorado completo, pós-doutorado completo.
4. Qual o seu cargo?
5. Você tem quantos anos de experiência profissional? 1 a 5 anos; 6 a 10 anos; 11 a 15 anos; 16 a 20 anos; mais de 21 anos.
6. Você já utilizou a metodologia BIM em um projeto?
7. Você já aplicou alguma linguagem de programação, como Programação Visual, JavaScript, Python, Java, PHP, CSS, C#, C++, C, entre outros?

### Seção 2: Avaliação dos entrevistados quando a funcionalidade

1. É fácil utilizar o processo da metodologia?

1 / 2 / 3 / 4 / 5

2. A alimentação de dados nas rotinas do Dynamo pode ser preenchida com facilidade?

1 / 2 / 3 / 4 / 5

3. É fácil a utilização da planilha 1, que apresenta os dados de volumes das áreas das estacas e dos pontos de intersecções de corte para aterro ou vice-versa?

1 / 2 / 3 / 4 / 5

- Qual a dificuldade quanto a utilização da planilha 1?

4. É fácil a consulta e análise da planilha 2, que apresenta as distâncias de cada corte para cada aterro?

1 / 2 / 3 / 4 / 5

- Qual a dificuldade quanto a utilização da planilha 2?

5. É fácil a utilização e análise da planilha 3, que é para distribuição de terra de corte para aterro?

1 / 2 / 3 / 4 / 5

- Qual a dificuldade quanto a utilização da planilha 3?

6. É fácil inserir e exportar o IFC as informações nas propriedades do modelo com os dados de estimativa de custo de escavação, carga e transporte de acordo com o a Distância Média de Transportes (DMT)?

1 / 2 / 3 / 4 / 5

- Qual a dificuldade quanto a inserir e exportar o IFC do modelo com os dados de estimativa de custo?

### **Seção 3: Avaliação dos entrevistados quando a utilidade da metodologia**

1. Você já utilizou a linguagem de programação visual para fazer distribuição de terra de corte para aterro e para ter o resultado no IFC do modelo do projeto? Sim/Não

2. Caso você tenha um profissional programador na equipe de projeto, você aceitaria aplicar uma rotina de Dynamo para extração de dados no seu projeto de maneira automatizada? Sim/Não

3. Quais são os impactos da metodologia de distribuição de terra de corte para aterro? Selecione uma ou mais opções abaixo.

- Precisão e confiabilidade de dados
- Redução de tempo para distribuição de corte para aterro de acordo com o DMT
- Aumento de tempo para distribuição de corte para aterro de acordo com o DMT
- Redução de custo de obra
- Nenhuma das alternativas

4. Quais são os impactos da metodologia de estimativa de custo no IFC do projeto? Selecione uma ou mais opções abaixo.

- Melhoria nas tomadas de decisões

- Melhoria na interoperabilidade de informações entre diferentes softwares
- Facilidade na orçamentação do projeto
- Perda de tempo de produção
- Nenhuma das alternativas

5. Depois de participar das atividades dessa pesquisa, futuramente você tem interesse em aplicar linguagem de programação visual para ter uma estimativa de custo de distribuição de terra de corte para aterro e para ter o resultado no IFC do projeto? Sim/Não/Talvez

6. Você tem observações quanto a aplicação dessa metodologia sobre automação de informações para estimativa de custo de projetos de infraestrutura utilizando o BIM?

## APÊNDICE D – RESULTADO DO *SCRIPT* 1

A seguir são apresentados os resultados do *Script* 1 e a compilação desse produto.

- Tabela 8 – Volume de terraplenagem:

[Link da Tabela 1](#)

- Tabela 9 – Matriz de distância entre corte e aterro:

[Link da Tabela 2](#)

- Tabela 10 – Distribuição de terra com origem para destino:

[Link da Tabela 3](#)

- Compilação das Tabelas 1, 2 e 3:

[Link da Tabela 1, 2 e 3 compiladas](#)