

# Caracterização de metodologias para extração de quantitativos com foco no orçamento de projetos em BIM

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.48>

**Glauber Moreira<sup>1</sup>, Michele Carvalho<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade de Brasília, Brasília, 0009-0007-5410-9350

<sup>2</sup> Universidade de Brasília, Brasília, 0000-0001-7969-9341

## Resumo

O processo de orçamentação, tanto no âmbito do BIM quanto no contexto tradicional, demanda automatização de fluxos de trabalho primordialmente ligados à etapa de consolidação de quantitativos, devido ao seu papel determinante no nível de precisão do orçamento. A literatura internacional indica diretrizes ligadas à interoperabilidade como caminho para a automatização de tal etapa. Portanto, o estudo busca caracterizar metodologias de extração de quantitativos para orçamento de projetos em BIM à luz das recomendações científicas, considerando problemas de interoperabilidade. A abordagem metodológica contou com três etapas. A primeira consistiu em busca de publicações focadas no desenvolvimento de metodologias para extração de quantitativos de projetos em BIM. A segunda etapa buscou caracterizar os estudos em função de critérios ligados à interoperabilidade tais como a perda de informação e método de intercâmbio de dados, além de classificar as metodologias em função de atributos do orçamento. A terceira etapa realizou agrupamento das metodologias pelo método estatístico *k-means* e realizou associações entre as características encontradas. Os resultados indicaram baixa aderência das metodologias com relação às principais diretrizes para automatização da orçamentação por problemas ligados à necessidade de preparação prévia dos modelos e pouca associação dos projetos a bancos de dados, apesar das estratégias buscarem alternativas para os principais gargalos do processo de orçamentação de projetos em BIM.

## 1. Introdução

O processo de orçamentação, tanto no cenário do BIM quanto no contexto tradicional, demanda automatização de fluxos de trabalho em sua etapa principal, referente à consolidação dos quantitativos do projeto, conforme [1] e [2]. Tal etapa onera tempo e esforço da equipe [3], contém etapas tradicionalmente manuais [4] e figura entre as motivações para o retrabalho [5] devido à dificuldade de gerenciamento/manipulação dos dados por excesso de informação [6] e/ou falta de ferramentas práticas para extração destes quantitativos [7].

Os trabalhos de [8] e [9] indicam ainda que a modelagem do projeto configura em obstáculo para a extração automatizada de quantitativos, principalmente se não estiver de acordo com as informações requeridas pelo nível de precisão do orçamento [5] (ou grau de detalhe, segundo [2]) além de demais atributos da estimativa de custos, tais como a integração com ciclo de vida dos custos (LCC – *life cycle costs*) e eficiência, conforme [3] e [10].

A literatura internacional consolidada através de [11], propõe diretrizes para a implementação do BIM no suporte ao levantamento de quantitativos, tais como: necessidade de estabelecer limites explícitos para o nível de desenvolvimento ou *Level of Development* (LOD) dos modelos a partir do objetivo de cada orçamento além da padronização de informações para otimizar a precisão dos quantitativos. O referido estudo permite concluir que as diretrizes buscam essencialmente solucionar problemas ligados à interoperabilidade, análogos à perda de dados, variedade de métodos para extração de informações, problemas de tradução e barreiras proprietárias de linguagens de dados, como indicado por [12].

Os estudos de [4], [13] e [14] indicam que as estratégias atuais ainda se encontram aquém do que se espera da automatização da orçamentação em BIM, sendo ainda necessária intervenção do orçamentista na inferência de métodos construtivos, itens de trabalho e critérios de medição dos serviços conforme bases de custos referenciais.

Portanto, o foco deste estudo é caracterizar metodologias para a extração de quantitativos de projetos em BIM com foco no processo de orçamento, discutindo o panorama da automatização do orçamento em BIM à luz das recomendações da literatura científica internacional, sedimentadas pelas diretrizes de [11].

## 2. Metodologia

A metodologia adotada se dividiu em três etapas: a inicial consistiu em busca sistemática na literatura. A segunda, caracterizou os estudos encontrados quanto a atributos do orçamento e a problemas de interoperabilidade. Já terceira etapa, sistematizou análise para a correlação entre os atributos e características dos estudos com base nas diretrizes de [11].

Para a primeira etapa, a busca se deu por meio de duas *strings*: (*bim -AND- quantity take off -AND- costs*) e (*bim -AND- quantity surveying -AND- costs*). Foram adotadas duas bases de dados (*Web of Science* e *Scopus*), sem filtragem de período, selecionando artigos de periódicos, revisões e publicações de conferência. Após a remoção de duplicatas, foi realizada a leitura de títulos e resumos para seleção dos métodos de extração de quantitativos a serem caracterizados.

Na segunda etapa, a caracterização das metodologias selecionadas partiu de matriz estruturada em oito critérios separados em dois blocos de análise, conforme a Tabela 1. Os blocos e critérios foram selecionados considerando que as diretrizes sinalizadas por [11], para automatização da orçamentação em BIM, têm relação com dificuldades relativas à troca de informação, ou seja, à interoperabilidade.

Portanto, os critérios motivaram perguntas-chave para caracterizar as metodologias de forma objetiva e binária (respostas de “sim” ou “não”), detalhadas pela Tabela 1.

Tabela 1: Blocos de análise e critérios da matriz de caracterização.

Bloco de análise	Critério de caracterização	Pergunta-Chave
Bloco 01: perda de dados	Omissões	“O procedimento verificou alguma omissão de quantitativos?”
	Erros	“Houve erros na extração de quantitativos de intersecções do modelo ou decorrentes de incompatibilidades de projeto?”
	Preparação de modelo	“Foi necessário adaptar ou preparar o modelo para a extração?”
Bloco 02: extração de dados	Método direto	“Utilizou método de transferência de dados por meio de alguma API?”
	Método indireto	“Utilizou método de transferência de dados indiretos (arquivo/arquivo ou arquivo/CDE ou arquivo/banco de dados)?”
	Modelo de linguagem proprietário	“Utilizou alguma linguagem de modelagem patenteada por algum software?”
	Modelo de linguagem aberto	“Utilizou alguma linguagem de modelagem com código aberto?”
	Modelo de linguagem misto	“Houve alguma integração de métodos diretos e indiretos para extrair quantitativos?”

A segunda etapa ainda classificou as metodologias conforme atributos ligados à estimativa de custos: grau de detalhe do orçamento [2] e validação da eficiência [3], conforme a Tabela 2. A classificação parte da premissa de que as diretrizes de [11] recomendam vinculação entre características do orçamento e modelagem para automatização do fluxo de trabalho no 5D.

Tabela 2: Classificação de atributos das metodologias quanto à estimativa de custos.

Atributos da estimativa de custos	Classificação utilizada
Grau de detalhe do orçamento	Estimativa de custos Orçamento preliminar Orçamento executivo Não informa
Eficiência	Comparação com orçamento real Comparação com quantidades reais Tempo de elaboração do orçamento Eficiência parametrizada por indicadores (m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> , etc.) Não informa

A terceira etapa agrupou as metodologias encontradas com base nas respostas das perguntas-chave da Tabela 1, admitindo para a resposta “sim”, o valor 1 e, para “não”, o valor 0. Posteriormente, foi realizada análise dos atributos comuns a cada agrupamento, baseada nas classificações da Tabela 2.

Para o agrupamento das metodologias, utilizou-se a linguagem de programação em R, por meio da técnica *k-means* [15]. A técnica escolhida consiste em definir número ótimo de agrupamentos (ou *clusters*) e segmentar os dados que têm valor estatisticamente relacionado.

O número ótimo de *clusters* foi encontrado a partir do método *Elbow* [15], que determina graficamente, através do “fenômeno do cotovelo”, a quantidade de agrupamentos ideal, com base nos valores de *k-means*. Toda a formulação matemática utilizada se deu com auxílio dos pacotes “*FactoMineR*”, “*factoextra*” e “*cluster*” da biblioteca aberta *RStudio*.

### 3. Discussão e resultados

A metodologia de busca obteve 212 publicações. Após a exclusão de duplicatas, 67 estudos foram classificados para de leitura de títulos e resumos, contudo, apenas 13 publicações se mostraram coerentes com a inovação de metodologias e/ou processos estruturados para a extração de quantitativos focados no orçamento de projetos em BIM.

Dentre as publicações selecionadas, ainda se levou em conta as que realizaram comparativos entre métodos de extração. Cabe informar que, por adesão ao escopo, através de pesquisa em referências dos documentos aderidos, houve a inclusão dos estudos de [16], [17] e [18]. As metodologias identificadas estão sumarizadas a seguir:

- Os estudos de [4] e [19] propuseram processo ontológico de inferência para determinar itens de trabalho e demais especificações determinantes do orçamento com base em regras de raciocínio semântico. O método diminuiu a

subjetividade do orçamentista por utilizar base de dados do BIM a partir dos modelos de linguagem IFCxml e RDF.

- [20] sugeriu a extração de quantitativos através da modelagem de protótipo baseado no formato IFC para melhoria da confiabilidade da estimativa de custos a partir da análise do nível de detalhamento, elaboração de modelo em Revit e posterior exportação para IFC com objetivo de extrair quantitativos, checagem do modelo e extração. Não houve estudo de caso ou validação da eficiência do procedimento.
- [17] desenvolveu API para consulta de posições e geometria de modelos em BIM desenhando fronteiras externas dos elementos em CAD para cálculo de área, volume e demais dimensões de elementos estruturais e de tubulações através de consulta em banco de dados da Microsoft Access. A validação do método seu deu pela comparação com quantitativos conhecidos de um projeto real.
- [6] realizou o comparativo entre métodos tradicionais de extração de quantitativos manuais (empíricos e baseado em desenhos) e procedimento baseado em softwares BIM a partir de estudo de caso de edificação real. A metodologia permitiu evidenciar melhor eficiência da extração de quantitativos baseada na tecnologia BIM.
- [10] propôs fluxo de trabalho utilizando o software CostX da Exacta, adaptando-o para análises de ciclo de vida dos custos. O método de avaliação se deu através da usabilidade (atendimento ou não de tarefas) com intuito de verificar se o uso de tecnologias de orçamento já existentes atende o requerido para análises de ciclo de vida.
- [18] propôs rotina de cálculo de formas para concreto utilizando programação visual através do Dynamo integrado ao Revit, valendo-se de regras para a filtragem e classificação de superfícies evitando sobreposições de elementos que pudessem acarretar erros na quantificação de áreas. A validação da metodologia se deu através da comparação das áreas extraídas com quantidades selecionadas manualmente via Sketchup.
- [21] propôs fluxo de trabalho em BIM para cálculo de quantidades de membros estruturais baseados nas regras do Código Chinês. Houve desenvolvimento de algoritmo que traduz regras de geometria do Revit conforme o referido código. O algoritmo revisa as quantidades calculadas em aberturas e juntas. A validação do método se deu a partir da comparação de quantidades calculadas manualmente e os outputs do algoritmo.
- [22] criou plataforma utilizando ASP.NET e C# para automatizar fluxo de cálculos de quantitativos para orçamento de superestrutura e infraestrutura de edifícios em concreto. A interface foi desenvolvida em API da web e deixou a cargo do orçamentista a entrada de dados para devolver a estimativa de custo, economizando tempo e aumentando acurácia do orçamento obtido em contraste com processos tradicionais (Excel).
- [23] propôs algoritmo que utiliza modelagem semântica e processamento de linguagem natural para identificar e classificar instâncias de informações de projetos que correspondem às especificações para o orçamento. O método

de avaliação foi por comparação entre informações lidas e tempo gasto em relação a padrão manual adotado.

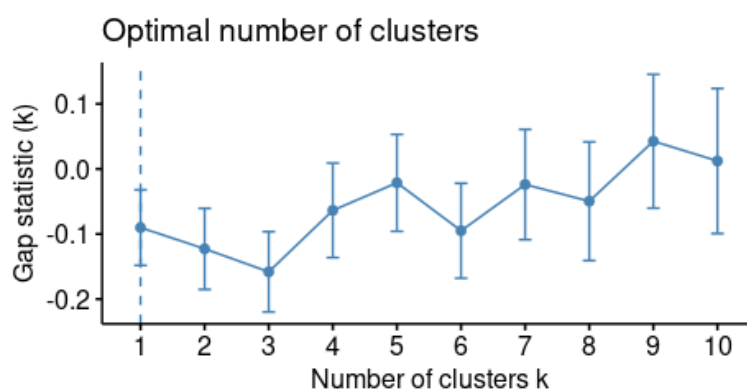
- [24] propôs fluxos de trabalho em BIM para estimativa de quantitativos de projetos de terraplanagem utilizando 3 técnicas de fotogrametria aérea não tripulada e comparou com o processo tradicional de estimativa de quantidades baseado no Sistema GNSS. O método de comparação se deu através dos volumes e áreas calculados pelo Autodesk Civil 3D e os resultados obtidos pelas 3 técnicas.
- [25] propôs processo de extração de quantitativos que envolve a modelagem do conhecimento, regras de medição e informações necessárias para checagem semântica do modelo BIM em conjunto com algoritmos para cálculo automático de quantitativos em conformidade com as regras do Hong Kong Standard Method of Measurement 4.
- [26] propôs API que automatiza a extração de propriedades dos elementos de um modelo BIM e armazena a informação em um banco de dados que estrutura tabelas de propriedades para consulta de informação permitindo o cálculo da quantidade real cada elemento modelado nos softwares Revit e Tekla.
- [27] utiliza varreduras a laser terrestre (TLS) para escanear o edifício e, em seguida, cria um modelo em BIM para posterior extração de quantitativos de materiais e mão de obra necessários para serviços de manutenção do edifício. A validação da eficiência foi por comparação entre quantidades obtidas e tempo de extração pelo método manual e pelo método Scan-to-BIM.
- [28] utiliza assinaturas invariantes para classificar objetos em modelos BIM e extrair quantitativos automaticamente a partir de aprendizado de máquina que classifica os objetos em categorias relevantes. As assinaturas definidas são metadados dos objetos que não mudam com a escala, rotação ou posição.
- [16] propôs matriz de parâmetros de uma EAP padronizada, a partir de banco de dados de projetos e orçamentos, para a criação de filtros para extração de quantitativos utilizando o Revit. A avaliação de eficiência do método se deu por comparação entre o tempo de extração de quantitativos manualmente e com o método proposto.

Em conjunto com a leitura das publicações, foram consolidadas as respostas das perguntas-chave da Tabela 1 na matriz de caracterização, detalhada na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz de caracterização.

Referência dos estudos	Bloco 01 - perda de dados			Bloco 02 - extração de dados				
	Omissões	Erros	Preparação do modelo	Método direto	Método indireto	Modelo de linguagem proprietário	Modelo de linguagem aberto	Modelo de linguagem misto
[4] e [19]	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
[6]	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM
[10]	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
[25]	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM
[16]	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
[17]	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM
[18]	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
[28]	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
[26]	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO
[27]	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM
[23]	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
[24]	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO
[22]	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM
[21]	NÃO	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
[20]	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	SIM
<b>Totais de "NÃO"</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Totais de "SIM"</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>6</b>

Os dados da Tabela 3 convertidos em 0 e 1, permitiram determinar, pelo método *Elbow*, a quantidade ótima de 3 *clusters*, conforme a Figura 1.

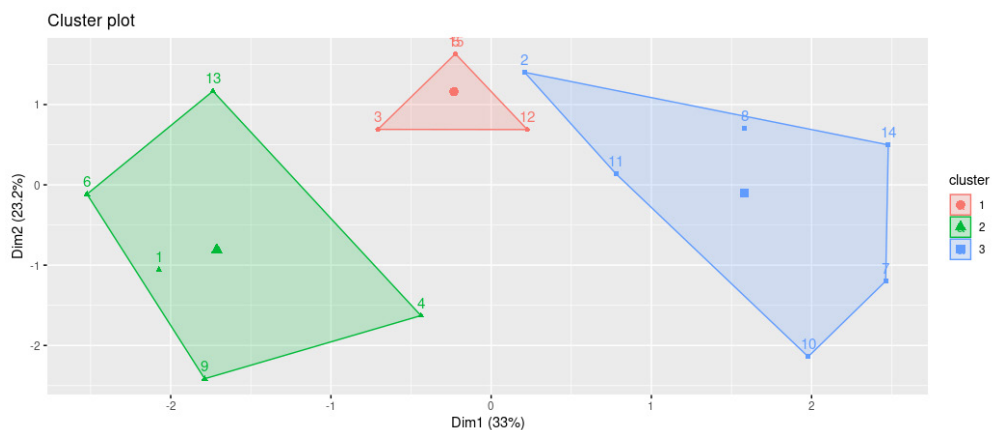


**Figura 1**  
Número ótimo de clusters pelo método *Elbow*,  $k=3$ .

Portanto, a partição dos dados através do método *k-means*, se deu a partir de 3 *clusters*, onde cada numeração nos vértices dos polígonos corresponde a uma metodologia da matriz de caracterização, conforme a Figura 2.

**Figura 2**

Clusters das metodologias de extração de quantitativos para orçamento em BIM.



A relação entre os números nos vértices dos *clusters* e as metodologias está detalhada na Tabela 4, a qual relaciona, por *cluster* (vermelho - 1, verde - 2 e azul - 3), a referência das publicações da matriz de caracterização (Tabela 3) com o grau de detalhe e eficiência dos orçamentos.

Tabela 4: Resumo dos agrupamentos e classificações.

Numeração da Figura 2	Numeração cluster da Figura 2	Referência do estudo na matriz	Grau de detalhe do orçamento	Eficiência
3	1	[10]	Não informa	Eficiência parametrizada por indicadores (m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> , etc)
5		[16]	Orçamento executivo	Tempo de elaboração do orçamento
12		[21]	Não informa	Comparação com quantidades reais
15		[18]	Não informa	Comparação com quantidades reais
1	2	[4] e [19]	Não informa	Eficiência parametrizada por indicadores (m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> , etc)
4		[25]	Não informa	Comparação com quantidades reais
6		[28]	Não informa	Comparação com quantidades reais
9		[23]	Orçamento executivo	mais de um método (tempo e quantidades)
13		[20]	Não informa	Não informa
2	3	[6]	Não informa	Comparação com quantidades reais
7		[26]	Não informa	Comparação com quantidades reais
8		[27]	Não informa	mais de um método (tempo e quantidades)
10		[24]	Não informa	Comparação com quantidades reais
11		[22]	Orçamento executivo	mais de um método (tempo e quantidades)
14		[17]	Não informa	Comparação com quantidades reais

A Tabela 3, mostra, pelo bloco 01 (perda de dados), que a maioria das metodologias ainda não apura erros na extração de quantitativos decorrentes de incompatibilidades de projeto além de não serem capazes de verificar omissões de quantitativos após a extração. Ainda é percebida a usual necessidade de preparações prévias dos modelos antes de realizar a extração dos quantitativos.



Já em relação ao bloco O2 (métodos de extrações de dados), notam-se usuais modelos de linguagem proprietários (11 de 15 metodologias). Por outro lado, as publicações que utilizam linguagens abertas, ainda que de maneira mista, são mais recentes, demonstrando tendência aos benefícios da interoperabilidade aberta para a estabilização dos fluxos de trabalho na extração de quantitativos, conforme a expectativa das diretrizes de [11].

A partir da análise dos *clusters* gerados pelo *k-means*, na Tabela 4, ainda não há associação evidente dos quantitativos obtidos pelas metodologias de extração com o grau de detalhamento requerido pelos orçamentos, enfatizada pelas diretrizes de [11]. Pela análise da eficiência, foi possível verificar que o principal parâmetro de validação é o tempo gasto na elaboração do orçamento bem como a precisão dos quantitativos obtidos. Contudo, os 3 agrupamentos encontrados não possibilitaram traçar perfil específico de cada *cluster*, provavelmente pela baixa quantidade de publicações encontradas.

Considerando ainda o estudo realizado por meio da leitura das publicações, nota-se que apesar da falta de vínculo entre as metodologias e o objetivo do orçamento [11], as inovações para extração de quantitativos focam principalmente na mitigação do que onera a equipe de orçamento: retrabalho [5], tempo e esforço gasto pela equipe [3]. Além disso, os métodos buscam contornar a falta de ferramentas práticas [7] e esbarram em questões ligadas à tradução da linguagem de dados para extração eficiente de quantitativos no ambiente BIM.

## 4. Conclusões

A caracterização dos métodos de extração de quantitativos para orçamento de projetos em BIM indicou que as inovações para o processo ainda não são capazes atender por completo as principais diretrizes [11] para a estabilização dos fluxos de trabalho com o orçamento, devido a problemas essencialmente ligados ao intercâmbio de informações, ou seja, à interoperabilidade. Dentre os entraves verificados, destaca-se a necessidade de preparação prévia dos modelos e baixa associação de modelos dos projetos a bancos de dados (métodos indiretos).

A caracterização ainda revela que os métodos ainda não são sensíveis a erros e omissões de quantitativos, o que pode comprometer a confiabilidade dos orçamentos gerados. Muito embora busquem solucionar os principais gargalos do processo de orçamentação [5], [3] e [7] por meio de avaliações de eficiência do orçamento, é evidente a falta de associação entre o objetivo dos orçamentos com as quantidades extraídas pelos métodos, recomendada nas diretrizes internacionais [11].

Por fim, em função da baixa quantidade de publicações e heterogeneidade dos *clusters* gerados, sugere-se o reagrupamento das metodologias por métodos apropriados a variáveis categóricas (*k-modes*) bem como a expansão da busca em mais bases de dados para melhores conclusões.

## Referências

- [1] F. F. Marchiori and M. T. M. Carvalho, *Conhecendo o orçamento de obras: como tornar seu orçamento mais real*, 1a Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- [2] A. D. Mattos, *Como preparar orçamentos de obras*, 3a Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- [3] Alzara M., Attia Y.A., Mahfouz S.Y., Yosri A.M, and Ehab A., "Building a genetic algorithm-based and BIM-based 5D time and cost optimization model," *IEEE Open Access*, 2023.
- [4] S. K. Lee, K. R. Kim, and J. H. Yu, "BIM and ontology-based approach for building cost estimation," *Autom Constr*, vol. 41, pp. 96-105, 2014, doi: 10.1016/j.aut-con.2013.10.020.
- [5] L. D. Trindade, "Modelagem da Informação da Construção (BIM) e orçamento evolutivo: contribuições para a automatização do levantamento de quantitativos em projeto," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- [6] S.-W. Whang, "Building Information Modeling (BIM) for Project Value: Quantity Take-Off of Building Frame Approach," *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, doi: 10.13140/RG.2.1.4982.9366.
- [7] M. T. Clark, Alzraiee, and Hani S, "A FRAMEWORK FOR COST ESTIMATION USING BIM OBJECT PARAMETERS," in *CSCE Annual Conference*, 2019.
- [8] T. Moses, D. Heesom, and D. Oloke, "Implementing 5D BIM on construction projects: contractor perspectives from the UK construction sector," *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 1867-1888, Oct. 2020, doi: 10.1108/JEDT-01-2020-0007.
- [9] M. I. Ghani, "4D/5D Building Information Modelling; How to create an integrated model," *POLITECNICO DI MILANO*, 2021.
- [10] D. Kehily and J. Underwood, "Embedding life cycle costing in 5D BIM," 2017. [Online]. Available: <http://www.itcon.org/2017/8>
- [11] R. Sacks, C. Eastman, P. Teicholz, and G. Lee, *Manual de BIM: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores*, 3a edição. Editora Bookman, 2021.
- [12] G. Lee, "What Information Can or Cannot Be Exchanged?," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2011, doi: 10.1061/ASCECP.1943-5487.0000062.

- [13] S. Aram, C. M. Eastman, and R. Sacks, "A knowledge-based framework for quantity takeoff and cost estimation in the AEC industry using BIM," in *31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, ISARC 2014*, 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/288591871>
- [14] S.-A. Kim, S. Chin, S.-W. Yoon, T.-H. Shin, Y.-S. Kim, and C. Choi, "Automated Building Information Modeling System for Building Interior to Improve Productivity of BIM-based Quantity Take-Off," in *Information and Computational Technology*, 2009.
- [15] B. Everitt and T. Hothorn, *An Introduction to Applied multivariate Analysis with R*. Springer Science & Business Media, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-9650-3.
- [16] R. L. dos Santos, C. R. Campelo Filho, and B. M. V. Valério, "Otimização da extração de quantitativos para orçamento de obras por meio de software BIM: uma proposta de matriz de parâmetros," *Gestão & Tecnologia de Projetos*, vol. 18, no. 1, pp. 151-172, Aug. 2023, doi: 10.11606/gtp.v18i1.204175.
- [17] H. Taghaddos, A. Mashayekhi, and B. Sherafat, "Automation of Construction Quantity Take-Off: Using Building Information Modeling (BIM)," in *Construction Research Congress ASCE*, 2016, pp. 2218-2227.
- [18] C. Khosakitchalert, N. Yabuki, and T. Fukuda, "Automatic Concrete Formwork Quantity Takeoff Using Building Information Modeling," in *Proceedings of the 19th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR2019)*, 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/337286106>
- [19] S. Lee, K. Kim, and J. Yu, "Ontological inference of work item based on BIM data," *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 538-549, Mar. 2015, doi: 10.1007/s12205-013-0739-5.
- [20] J. Choi, H. Kim, and I. Kim, "Open BIM-based quantity take-off system for schematic estimation of building frame in early design stage," *J Comput Des Eng*, vol. 2, no. 1, pp. 16-25, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jcde.2014.11.002.
- [21] B. Yang, B. Zhang, J. Wu, B. Liu, and Z. Wang, "A BIM-based Quantity Calculation Framework for Frame-shear Wall Structure," *Structural Engineering International*, vol. 29, no. 2, pp. 282-291, Apr. 2019, doi: 10.1080/10168664.2018.1550352.
- [22] J. H. Yousif, S. N. Abdul Majeed, and F. J. I. Al Azzawi, "Web-based architecture for automating quantity surveying construction cost calculation," *Infrastructures (Basel)*, vol. 5, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES5060045.
- [23] T. Akanbi and J. Zhang, "Design information extraction from construction specifications to support cost estimation," *Autom Constr*, vol. 131, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103835.

- [24] P. Kavaliauskas, D. Židanavičius, and A. Jurelionis, “Geometric accuracy of 3d reality mesh utilization for bim-based earthwork quantity estimation workflows,” *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 10, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/ijgi10060399.
- [25] H. Liu, J. C. P. Cheng, V. J. L. Gan, and S. Zhou, “A knowledge model-based BIM framework for automatic code-compliant quantity take-off,” *Autom Constr*, vol. 133, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.104024.
- [26] B. Sherafat, H. Taghaddos, and E. Shafaghat, “Enhanced automated quantity take-off in building information modeling,” *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 3 A, pp. 1024-1037, May 2022, doi: 10.24200/SCI.2021.56668.4847.
- [27] M. C. P. Sing, S. Y. Y. Luk, K. H. C. Chan, H. J. Liu, and R. Humphrey, “Scan-to-BIM technique in building maintenance projects: practicing quantity take-off,” *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 2022, doi: 10.1108/IJBPA-06-2022-0097.
- [28] J. Wu, T. Akanbi, and J. Zhang, “Constructing Invariant Signatures for AEC Objects to Support BIM-Based Analysis Automation through Object Classification,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 36, no. 4, Jul. 2022, doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0001012.