



Alessandra Santiago Rosso Di San Secondo

**Proposta de fluxo de trabalho BIM considerando
fabricação e montagem de elementos estruturais
em projetos de edificações replicáveis em escala**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadora: Profa. Elisa Dominguez Sotelino

Rio de Janeiro
Setembro de 2020



Alessandra Santiago Rosso Di San Secondo

**Proposta de fluxo de trabalho BIM considerando
fabricação e montagem de elementos estruturais
em projetos de edificações replicáveis em escala**

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

Profa. Elisa Dominguez Sotelino

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Giuseppe Miceli Junior

Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção - IME

Rio de Janeiro, 04 de setembro de 2020

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

Alessandra Santiago Rosso Di San Secondo

Graduou-se em Engenharia Civil pela PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro), no Rio de Janeiro em 2017. Entrou no programa de Pós-graduação da PUC-Rio em 2018 e desenvolveu a dissertação na linha de pesquisa BIM alinhada a processos de fabricação e montagem de elementos estruturais e planejamento construtivo de obras de edificações replicáveis em escala.

Ficha Catalográfica

Rosso Di San Secondo, Alessandra Santiago

Proposta de fluxo de trabalho BIM considerando fabricação e montagem de elementos estruturais em projetos de edificações replicáveis em escala / Alessandra Santiago Rosso Di San Secondo ; orientadora: Elisa Dominguez Sotelino. – 2020.

107 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. BIM. 3. Projetar para fabricação e montagem. 4. Planejamento de construções replicáveis. 5. Construtibilidade. 6. Mapa de processo. I. Sotelino, Elisa Dominguez. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A minha família, Newton, Sonia, Elizabeth, Peter e Phillipe por todo amor, dedicação e oportunidades que me foram dadas. Por todos os momentos de incentivo e orientação. Obrigada por sempre me apoiarem nos meus sonhos, serão sempre minha base.

À minha orientadora, Elisa Sotelino, do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Obrigado por todos os seus ensinamentos, pela confiança depositada, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e por seu apoio, paciência, compreensão e total disponibilidade ao longo da pesquisa.

Ao meu namorado, Felipe, por todo o apoio, paciência, incentivo e carinho em todos os momentos. Obrigada pelo seu companheirismo.

Aos meus amigos de mestrado, em especial Alexandre, Catarina, Cristiano, Isabel, Julio, Nayara e Verissa que compartilharam momentos de ansiedade, preocupação e a rede de incentivo e apoio nesse período de mestrado.

Ao grupo de Pesquisa RioBIM que contribuiu para este trabalho com sugestões, questionamentos, contribuições e pela oportunidade de me aprofundar e contribuir com tantas outras pesquisas.

Aos professores e equipe de graduação e pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio. Em particular, Daniel e Jaqueline, pelo apoio e incentivo.

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

Resumo

San Secondo, Alessandra Santiago Rosso Di; Sotelino, Elisa Dominguez. **Proposta de fluxo de trabalho BIM considerando fabricação e montagem de elementos estruturais em projetos de edificações replicáveis em escala.** Rio de Janeiro, 2020, 107p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A necessidade de aumentar a produtividade no setor da construção civil estimulou investimentos em soluções digitais e a incorporação de princípios de manufatura na cadeia construtiva. A implementação de elementos estruturais padronizados fabricados fora do canteiro de obra é considerada uma prática válida para atingir este objetivo. O projeto para fabricação e montagem é um conceito que envolve diretrizes a serem consideradas no desenvolvimento do projeto, cuja finalidade é facilitar a fabricação e montagem de componentes. A metodologia BIM pode incorporar análises de planejamento e construtibilidade para apoiar a tomada de decisão no contexto de construções replicáveis em escala de concreto armado. A presente investigação inclui uma revisão sistemática da literatura que orientou a pesquisa. Com base na SLR (*Structured Literature Review*), foi desenvolvido um Manual de Entrega de Informações que propõe um novo fluxo de trabalho no qual os estudos de planejamento construtivo e princípios de fabricação e montagem são agregados nos estágios iniciais do projeto para aproveitar a colaboração intrínseca da metodologia BIM. Para ilustrar o fluxo de trabalho proposto no IDM (*Information Delivery Manual*) desenvolvido é apresentado um experimento de um complexo de escolas. As informações do modelo parametrizado serviram como dados de entrada para as análises realizadas permitindo assim que pudessem ser contemplados diferentes cenários de soluções estruturais. Os resultados obtidos pelo experimento indicam que a consideração de elementos de concreto pré-fabricado nem sempre vai contra os interesses econômicos, práticos e estéticos. Por fim, as análises de planejamento e construtibilidade são parâmetros importantes nas tomadas de decisão para aprimorar a identificação de oportunidades de melhorias no projeto e potencializar a eficiência de trabalho no canteiro de obra.

Palavras-chave

BIM; projetar para fabricação e montagem; planejamento de construções replicáveis; construtibilidade; mapa de processo; produtividade.

Abstract

San Secondo, Alessandra Santiago Rosso Di; Sotelino, Elisa Dominguez. **Information delivery manual considering manufacturing and assembly of structural elements in replicable building projects**. Rio de Janeiro, 2020, 107p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The need to increase the civil construction sector stimulates investments in digital solutions and manufacturing principles in construction industry. The employment of standardized structural elements manufactured off-site construction, such as structural precast element, is considered a valid practice to achieve this purpose. The Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) is a concept that involves guidelines considered in the development of the project and has the objective to facilitate the manufacturing and assembly of a product or component. Building Information Modeling (BIM) methodology can incorporate planning and constructability analysis to support decision making in the context of scalable and replicable concrete building projects. The present investigation includes a Structured Literature Review (SLR) that guided the research. Based on the SLR, an Information Delivery Manual (IDM) was developed to propose a new workflow in which the studies of construction planning and the application of manufacturing and assembly principles are considered in the early stages of design to take advantage of the collaboration intrinsic to the BIM methodology. An experiment of a school complex is presented to illustrate the workflow proposed in the developed IDM. The parametric model information was the key input to run analyzes in different structural solutions scenarios. The results indicated that the consideration of precast concrete elements does not always contradict economic, practical and aesthetic interests. Finally, planning and constructability analyzes are important parameters in decision-making, enhancing the recognition of opportunities for improvement in the project and increasing the efficiency of work in the construction site.

Keywords

BIM; design for manufacturing and assembly; repetitive construction scheduling; constructability; process map; productivity.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Motivação	13
1.2. Objetivo	14
1.3. Escopo	15
1.4. Estrutura do trabalho	15
2 Revisão estruturada da literatura	16
2.1. Método da revisão da literatura	16
2.1.1. Formulação das perguntas	17
2.1.2. Localização dos estudos	18
2.1.3. Seleção e avaliação dos artigos	19
2.2. Revisão dos artigos selecionados	22
2.2.1. BIM e DFMA	22
2.2.2. BIM e Planejamento de construções repetitivas	27
2.2.3. DFMA e Planejamento de construções repetitivas	30
3 Referencial teórico	34
3.1. Building Information Modeling	34
3.2. Edificações replicáveis em escala	37
3.2.1. Planejamento de construções repetitivas	37
3.2.2. Curva de Aprendizagem	40
3.3. Construtibilidade	41
3.3.1. Princípios construtivos	42
3.3.2. Abordagens para consideração de construtibilidade	43
3.4. Projetar para fabricação e montagem	44
3.4.1. Princípios de fabricação e montagem	45
3.4.2. Planejamento para fabricação e montagem	46
4 Método de pesquisa	48
4.1. Information Delivery Manual (IDM)	48
4.1.1. Mapa de processo	50
4.2. Experimento	53

4.2.1. Objetivo e contexto	53
4.2.1.1. Modelo e opções de cenário	55
4.2.2. Análise de planejamento e construtibilidade	57
4.2.2.1. Atribuições para o planejamento preliminar	58
4.2.2.2. Análise do cronograma	61
4.2.2.3. Análise do efeito aprendizagem	64
4.2.2.4. Análise de viabilidade econômica	65
4.2.2.5. Análise Construtiva	66
 5 Resultados e análises	 72
5.1. Análise de planejamento	72
5.1.1. Produtividade dos trabalhadores por atividade	72
5.1.2. Cronograma preliminar	74
5.1.3. Efeito aprendizagem	75
5.1.4. Viabilidade econômica	77
5.2. Análise de construtibilidade	78
5.3. Discussões dos resultados	81
 6 Conclusões	 83
 7 Referências	 86
 Apêndice A	 97
 Apêndice B	 98
 Apêndice C	 105

Lista de figuras

Figura 1 - Etapas da revisão estruturada da literatura. (Adaptada de SAIEG et al., 2018).	17
Figura 2 - Número de artigos publicados por ano desde 2015 até 2020..	22
Figura 3 – Gráfico da linha de balanço (Adaptado de DAMCI et al., 2013).	39
Figura 4 - Versão esquemática do IDM proposto.	51
Figura 5 - Fase do IDM: Projeto conceitual inicial.	55
Figura 6 - Escola modelada no <i>software</i> Autodesk Revit, fachadas em perspectiva.	56
Figura 7 - Ilustração das diferenças entre os cenários analisados.	57
Figura 8 - Fase do IDM: Análise de planejamento e construtibilidade.	58
Figura 9 – Comparativo entre os dois cenários do total de produtividade em homem-hora por atividade.	73
Figura 10 - Comparativo entre os dois cenários do total de produtividade em homem-hora no canteiro de obra.	74
Figura 11 - Comparativo entre as linhas de balanço dos cenários 01 e 02.	75
Figura 12 - Regressão do consumo de H.h por pavimento.	76
Figura 13 - Regressão de dias por pavimento.	77
Figura 14 - Comparativo do resultado do custo direto entre os cenários.	78
Figura 15 - Comparativo do resultado do índice de construtibilidade global.	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Grupo de palavras chaves e palavras derivadas.....	18
Tabela 2 - Combinação das palavras chaves e derivadas utilizadas.	19
Tabela 3 - Especificação dos filtros utilizados na pesquisa.....	20
Tabela 4 - Evolução no número de artigos usando critérios de filtragem.	21
Tabela 5 - Estágio do projeto vs Nível de Desenvolvimento (Adaptado de AIA e ACG, 2019).....	36
Tabela 6 - Tipologia das escolas.....	54
Tabela 7 - EAP para o projeto de estruturas moldas in loco e pré-fabricada.	58
Tabela 8 - Quadro com as informações do empreendimento.	59
Tabela 9 - Exemplo da atribuição da composição unitária SINAPI para montagem e desmontagem de fôrmas.....	60
Tabela 10 - Exemplo da atribuição da composição unitária EMOP-RJ para montagem de estruturas pré-fabricadas.....	61
Tabela 11 - Categoria Sistema estrutural (Adaptado de CAS, 2017).....	69
Tabela 12 - Categoria Padronização e repetição (Adaptado de CAS, 2017).	70
Tabela 13 - Categorias Boas práticas da indústria (Adaptado de CAS, 2017).	70
Tabela 14 - Cálculo do índice de construtibilidade.	78
Tabela 15 - Cálculo do índice de pontuação construtiva.	79
Tabela B- 1 Relação das composições unitárias atribuídas para o projeto de estrutura de concreto moldada in loco.	98
Tabela B- 2 Relação das composições unitárias atribuídas para o projeto de estrutura de concreto pré-fabricada.	102
Tabela C-1 Lista de verificação desenvolvida para análise construtiva.	105

Lista de abreviações

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

API - *Application Programming Interface*

BCA - *Building and Construction Authority*

BIM - *Building Information Modeling*

BPMN - *Business Process Modeling Notation*

CAS - *Constructability Appraisal System*

CEM - *Comprehensive Evaluation Model*

CPM - *Critical Path Method*

DFA - *Design for Assembly*

DFM - *Design for Manufacturability*

DFMA – *Design for Manufacturing and Assembly*

EAP - Estrutura Analítica do Projeto

EDI – Espaço de Desenvolvimento Infantil

EMOP-RJ - Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro

FAM - *Factor Analysis Model*

GIS – *Geographic Information Systems*

GPS - *Global Positioning Systems*

IDM - *Information Delivery Manual*

IFC - *Industry Foundation Classes*

LoB - *Line of Balance*

LOD - *Level of Development*

MVD – *Model View Definition*

PCP - Planejamento e Controle da Produção

PEB – Plano de Execução BIM

PPVC - *Prefabricated Prefinished Volumetric Construction*

RCS – *Repetitive Construction Scheduling*

RFID - *Radio Frequency Identification*

RUP - Razão Unitária de Produção

SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices

SLR – *Structured Literature Review*

Lista de símbolos

m - Taxa de produtividade

Q_i – Número de unidades de repetição inicial

Q_j - Número de unidades de repetição final

T_i – Tempo inicial de uma atividade

T_j - Tempo final de uma atividade

$H.h$ - Total de homens-hora despendido em uma atividade

QS - Quantidade de serviço realizado

Y_x - Custo, quantidade de homem-hora ou tempo necessário para x-ésima operação

A - Custo, quantidade de homem-hora ou tempo necessário para primeira operação

n - Parâmetro que caracteriza a curva de aprendizagem

S - Produtividade ganha devido ao efeito de aprendizagem

Q_{mat} - Quantidade total de material utilizado

I_c - Índice de construtibilidade do projeto e processo

P_o - Ponto obtido em cada item da lista de verificação.

P_p - Pontos possíveis da lista de verificação.

N_a - Itens que não se aplicam ao caso avaliado

I_p - Índice de pontuação construtiva

I_g - Índice de construtibilidade global

1

Introdução

1.1.Motivação

O setor da construção civil, nas últimas décadas, não se adaptou às mudanças relacionadas ao mercado, à tecnologia e ao processo de desenvolvimento e planejamento do projeto (CHOI et al., 2020). Apesar do aumento da complexidade dos processos construtivos das edificações e do nível de exigência dos clientes, a forma de atuação dos projetistas e a estrutura tradicional de desenvolvimento de projeto não sofreram alterações significativas (HEIGERMOSER et al., 2019).

De acordo com o WORLD ECONOMIC FORUM de 2016, houve uma queda de 20% na produtividade da indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) nos últimos 50 anos. Dentre os fatores críticos que servem como barreira para a evolução tecnológica do segmento de edificações no Brasil, destacam-se: baixa qualidade de alguns projetos devido ao baixo grau de racionalização prevista, padronização e coordenação modular; baixa produtividade da mão de obra e inibição da industrialização em função do elevado custo de implementação somado à escassez de mão de obra especializada.

Segundo HEIGERMOSER et al. (2019) o setor AEC está passando por transformações consideráveis com grandes investimentos de capital em soluções digitais em toda a cadeia de valor da construção. A modelagem da informação da construção (em inglês *Building Information Modeling* - BIM) pode ser vista como uma dessas transformações, uma vez que a sua implementação é capaz de aprimorar a tomada de decisões em estágio inicial do projeto por meio de visualização avançada de dados, detecção de conflitos e retirada de quantitativo de material (AKINADE et al., 2015; MAHAMADU et al., 2017).

Além disso, a parte estrutural de um projeto de construção é considerada uma etapa crítica de obra que exige elevado uso de mão de obra (BCA, 2017). Visando melhorias no fluxo do processo construtivo e na produtividade no canteiro de obra, a indústria da construção tem se apoiado em princípios de construção enxuta.

De acordo com O' CONNOR et al. (2014) conceitos como padronização de peças, engenharia de pré-montagem, transporte, instalação e especificação de revisão foram propostos para melhorar a construtibilidade dos projetos de construção. O princípio de projeto para fabricação e montagem (em inglês *Design For Manufacturing and Assembly* - DFMA) surgiu como procedimento e orientação de projeto que suporta a simplificação do produto, a integração de materiais e processos econômicos com o objetivo de alcançar a fabricação e a montagem ideais (ALFIERI et al., 2020; GBADAMOSI et al., 2018).

Apesar dos benefícios potenciais do DFMA e do BIM, faltam ferramentas de avaliação de projeto que integram os dois conceitos para ajudar os projetistas a avaliarem as implicações do projeto na montagem eficiente e aumentar a produtividade geral do setor de AEC (HAMDI; LEITE, 2012; SACKS et al., 2010).

Nesse contexto, o uso de BIM para desenvolver projetos de edificações replicáveis em escala, considerando princípios de fabricação e montagem de elementos estruturais, fornece um cenário promissor para o desenvolvimento e modernização do setor da construção civil.

1.2.Objetivo

Essa pesquisa tem como objetivo principal integrar a metodologia BIM com o planejamento construtivo de edificações replicáveis em escala de concreto armado visando melhorias na tomada de decisão por parte dos projetistas e cliente. As obras replicáveis em escala são caracterizadas por uma unidade de repetição, que pode ser uma casa, um edifício ou um pavimento. Especificamente procura-se esclarecer como projetistas e consultores de construção podem colaborar nos estágios iniciais de projeto. Assim, o objetivo específico deste estudo é elaborar um mapa de fluxo de informação que contemple o objetivo principal da pesquisa, além de avaliar através de métricas as opções de projeto que potencializem a eficiência construtiva, considerando princípios de fabricação e montagem de elementos estruturais.

1.3.Escopo

Este estudo se limitou à avaliação de obras replicáveis em escala de concreto armado de até três pavimentos. Para a análise de planejamento considerou-se apenas bases orçamentárias brasileiras.

Para cumprir o referido objetivo, um novo processo de trocas de informações é proposto em um ambiente BIM ilustrado em um IDM (*Information Delivery Manual*), que inclui estudos de planejamento construtivo na fase inicial do projeto e aplicação dos conceitos de projetar para fabricação e montagem. Um experimento baseado no IDM foi realizado para simular o processo de tomada de decisão com base nos cenários e resultados do estudo de planejamento e construtibilidade.

1.4.Estrutura do trabalho

Este documento está dividido em 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a motivação da pesquisa, os objetivos e o método do trabalho. Capítulo 2 descreve o processo e etapas da revisão estruturada da literatura (em inglês *Structured Literature Review* - SRL) e apresenta a lacuna na qual essa pesquisa pretende contribuir. Nele também é exposto uma análise e síntese dos principais artigos selecionados dentro das temáticas BIM, projetar para fabricação e montagem e planejamento de construções repetitivas. O capítulo 3 exibe um referencial teórico sobre os temas abordados. O capítulo 4 apresenta o método da pesquisa, que consiste no IDM proposto e na descrição do experimento e considerações iniciais para execução das análises. O capítulo 5 expõe os resultados do experimento, fornece comparações e uma discussão dos resultados. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões encontradas no decorrer da pesquisa e fornece algumas sugestões para possíveis pesquisas futuras sobre o assunto.

2

Revisão estruturada da literatura

Este capítulo apresenta a metodologia da revisão estruturada da literatura com objetivo de identificar lacunas de conhecimento e discutir as principais pesquisas que envolvem os assuntos de BIM, projetar para fabricação e montagem (DFMA) e planejamento de obras replicáveis em escala.

2.1.Método da revisão da literatura

Como forma de avaliar o tema proposto e identificar as lacunas de conhecimento presentes na literatura, foi conduzido uma revisão da literatura estruturada (SLR – *Structured Literature Review*). A relevância da SLR está na capacidade de encontrar informações acerca de uma temática específica, por meio do agrupamento e análise de estudos predecessores realizados por diferentes pesquisadores, promovendo um direcionamento a áreas de conhecimento onde a pesquisa é necessária (MUÑOZ et al., 2002).

A primeira etapa do processo de revisão é definir as perguntas que a pesquisa buscará responder. Em seguida, deve-se cumprir determinadas etapas: identificar e localizar os artigos, selecionar e avaliar os estudos e artigos cabíveis de serem incluídos, analisar e sintetizar as contribuições das pesquisas e reportar e usar os resultados (KITCHENHAM, B; CHARTERS, 2007; SAMPAIO; MANCINI, 2007)

Essas etapas preliminares são importantes, uma vez que auxiliam os pesquisadores a adequarem as perguntas norteadoras da revisão sobre o tema de interesse. Ademais, a explicação do processo de revisão é fundamental, principalmente no que diz respeito à seleção da literatura e às escolhas feitas em relação ao uso de termos específicos e bases de dados (SAMPAIO; MANCINI, 2007; SAUNDERS et al., 2008).

Segundo SAIEG (2017), uma revisão eficaz propicia a elaboração de uma base concreta e permite o avanço do conhecimento. A definição acurada dos critérios de avaliação torna o processo transparente, sólido e mostra a abrangência

da revisão. Esta definição também auxilia a identificação de temas que necessitem investigação futuras (WEBSTER; WATSON, 2002).

A revisão estruturada da literatura segue as etapas mostradas na Figura 1. Vale ressaltar que algumas etapas podem ser repetidas ou refinadas para melhorar os dados da pesquisa.

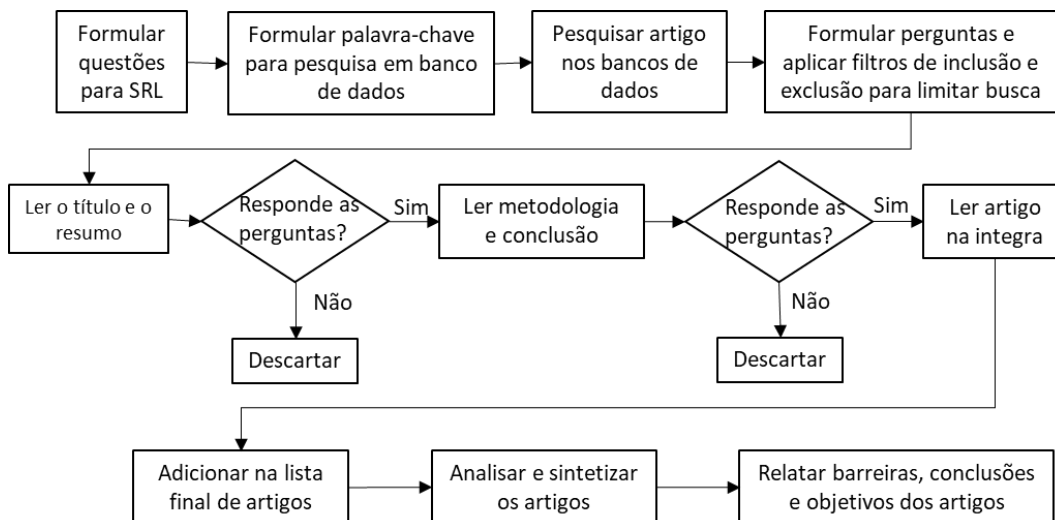


Figura 1 - Etapas da revisão estruturada da literatura. (Adaptada de SAIEG et al., 2018).

2.1.1. Formulação das perguntas

Para orientar a metodologia da revisão estruturada da literatura, a pesquisa atual formulou e considerou duas questões apresentadas abaixo. Para isso foram abordados assuntos relacionados a BIM; princípios de projetar para fabricação e montagem; planejamento construtivo de edificações replicáveis em escala, assim como as interações entre eles.

- Como a metodologia BIM influencia e favorece projetos replicáveis em escala utilizando princípios de projetar para fabricação e montagem?
- Como a utilização de elementos pré-fabricados e o planejamento de construções repetitivas interagem em um ambiente BIM, a fim de potencializar a produtividade no canteiro de obra?

2.1.2.Localização dos estudos

A próxima etapa da revisão estruturada da literatura é a definição de termos ou palavras-chaves que ajudarão a encontrar pesquisas com potencial de responder às questões formuladas. A escolha dos termos é de fundamental importância, uma vez que eles são os dados de entrada para navegar pelos bancos de dados e outras fontes de informação. Os termos foram estabelecidos em inglês de forma a entreter a literatura mundial sobre o assunto.

As palavras-chave foram divididas em dois grupos, o primeiro é o grupo principal e o segundo é o grupo derivado composto por palavras provenientes do grupo principal, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Grupo de palavras chaves e palavras derivadas.

Grupo Principal	Grupo Derivado
Building Information Modeling (BIM)	Information Flow IFC IDM Decision Making 4D
Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)	Precast Off-site Construction Constructability Buildability Prefabrication Assembly Lean Construction
Repetitive Construction Scheduling (RCS)	Construction Management Planning and Scheduling Line-of-balance Repetitive Project Productivity Construction Planning

Os bancos de dados e portais de acessos utilizados durante a pesquisa dos artigos foram o Scopus, Engineering Village e CAPES Periódicos. Em todos os bancos de dados selecionados foram utilizados “AND” e “OR” para combinar as palavras-chaves e as palavras derivadas, como apresentado na Tabela 2.

A primeira tentativa de filtro de pesquisa foi composta por três grupos principais e suas palavras derivadas, caracterizando artigos que envolvessem os temas: *Building Information Modeling* (BIM), *Design For Manufacturing and Assembly* (DFMA) e *Repetitive Construction Scheduling* (RSC). Nesta primeira

tentativa, apenas 3 artigos foram encontrados. Portanto, a primeira conclusão da SLR é que existe uma lacuna no conhecimento nessa combinação de áreas, o que justifica mais estudos.

O próximo passo foi a verificação da existência dessa lacuna. Para isso, foi necessário combinar as palavras chaves e as palavras derivadas em *strings* como apresentado na Tabela 2. Existem poucos estudos relacionados a BIM e DFMA (39 artigos); BIM e *Repetitive Constructions Scheduling* (24 artigos); DFMA e *Repetitive Constructions Scheduling* (21 artigos). À primeira vista, é possível concluir que existe uma lacuna relevante na combinação desses assuntos que será abordada nessa pesquisa.

Tabela 2 - Combinação das palavras chaves e derivadas utilizadas.

Primeira Tentativa	Segunda Tentativa
BIM AND (IFC OR IDM OR...) AND DFMA AND (Precast OR Off-site Construction OR ...) AND RCS AND (Construction Management OR Planning and Scheduling OR ...)	BIM AND (IFC OR IDM OR...) AND DFMA AND (Precast OR Off-site Construction OR ...) BIM AND (IFC OR IDM OR...) AND RCS AND (Construction Management OR Planning and Scheduling OR ...) DFMA AND (Precast OR Off-site Construction OR ...) AND RCS AND (Construction Management OR Planning and Scheduling OR ...)

2.1.3. Seleção e avaliação dos artigos

De acordo com SAUNDERS et al. (2008) os artigos publicados em periódicos são as fontes mais confiáveis para uma revisão da literatura e por isso, somente essas fontes devem ser consideradas em uma SLR.

Para ajudar a filtrar os resultados foram utilizados filtros apropriados que restringiam alguns artigos de acordo com as condições impostas de inclusão e exclusão, apresentados na Tabela 3. A aplicação desses filtros tem a finalidade de reunir uma amostra mais coerente, a partir da qual é possível tirar conclusões e identificar evidências científicas sobre a temática abordada.

Tabela 3 - Especificação dos filtros utilizados na pesquisa.

Incluir	Excluir
Artigos de periódicos	Outros (artigos de conferências, etc.)
Entre 2015 e 2020	Fora deste período
Inglês e Português	Todos os outros idiomas
Indústria AEC	Todos os outros

A partir dos resultados da busca, SAIEG et al. (2018) sugere que a seleção dos estudos seja realizada em três etapas.

- A primeira etapa é ler o título e os resumos de cada estudo encontrado avaliando e eliminando aquelas que não se relacionam com a temática abordada.
- O segundo passo inclui a leitura da metodologia e a conclusão do estudo aprovado na primeira avaliação, sendo possível eliminar ainda mais artigos irrelevantes para a pesquisa.
- O último passo é ler na íntegra as publicações aprovadas no segundo passo.

Essas etapas são capazes de filtrar os estudos selecionados e os demais artigos compondo a lista final de pesquisas relevantes que se enquadram na questão principal da presente revisão.

Durante a avaliação, apenas os trabalhos que responderam ou puderam responder a uma das três perguntas abaixo foram capazes de passar para a próxima etapa.

- Como o DFMA pode ser inserido na metodologia BIM?
- Que impacto a metodologia BIM gera no Planejamento de Construções Replicáveis em Escala?
- Como o DFMA pode auxiliar no Planejamento de Construções Replicáveis em Escala?

Para ilustrar e entender melhor essas etapas, a Tabela 4 apresenta os resultados e a aplicação dos filtros. Cada linha representa a combinação de termos e o número de artigos encontrados é descrito em cada coluna.

Tabela 4 - Evolução no número de artigos usando critérios de filtragem.

PALAVRAS-CHAVE	Sem Critérios de Inclusão e Exclusão	Com Critérios de Inclusão e Exclusão	Análise do Título e Resumo	Análise da Metodologia e Conclusão
BIM + DFMA	52	39	28	18
BIM + RSC	49	24	19	14
DFMA + RSC	41	21	20	18

A combinação DFMA e *Repetitive Construction Scheduling* (RCS) forneceu na primeira filtragem uma quantidade de trabalhos publicados menor do que as outras duas combinações, com um total de 21 artigos. A combinação BIM e DFMA produziu 39 artigos enquanto 24 foram encontrados sobre a combinação BIM e *Repetitive Construction Scheduling*.

A partir da Figura 2 pode-se observar que o número de publicações que relacionam BIM e DFMA tiveram um aumento significativo no ano de 2018. O interesse por essa combinação de áreas pode ser devido à crescente preocupação em aumentar a produtividade na indústria da construção civil por meio da introdução de princípios de construção enxuta e tecnologias mais avançadas. Também é importante destacar que o número de publicações que combinam BIM com *Repetitive Constructions Scheduling* vem aumentando gradualmente desde 2017 até o ano de 2019. Apesar do número de artigos produzidos que envolvem DFMA e RSF não ser expressivo no ano de 2018, a crescente observada nos anos de 2015 até 2017 pode se repetir nos anos de 2018 até 2020.

Com base nos números apresentados anteriormente, é possível inferir que existe uma lacuna de conhecimento em potencial na pesquisa combinando BIM, DFMA e *Repetitive Constructions Scheduling*. Como a metodologia BIM estimula a interdisciplinaridade e a troca de informações entre os participantes, a abordagem BIM desta pesquisa procura entender como a implementação de princípios de projetar para fabricação e montagem pode auxiliar no planejamento construtivo de edificações replicáveis em escala durante a concepção do projeto.

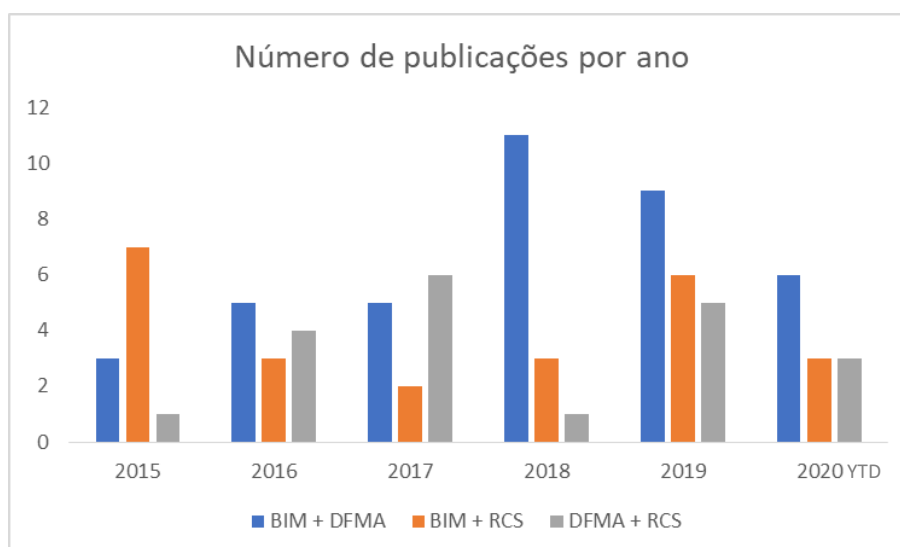


Figura 2 - Número de artigos publicados por ano desde 2015 até 2020.

Combinando as palavras-chaves e eliminando os artigos que não se relacionam com a temática abordada foram selecionados 50 artigos para análise completa.

2.2.Revisão dos artigos selecionados

Nesta seção, os 50 artigos selecionados na SLR são resumidos e breves comentários sobre suas propostas e resultados de pesquisa são apresentados. Para melhor compreensão, eles foram divididos em três tópicos: artigos BIM e DFMA, artigos BIM e Planejamento de construções repetitivas e, finalmente, artigos DFMA e Planejamento de construções repetitivas.

2.2.1.BIM e DFMA

Os artigos que relacionam os temas de BIM e projetar para fabricação e montagem tratam do desenvolvimento de ferramentas integradas a BIM que auxiliam no gerenciamento da sequência de montagem, avaliações de estratégias de construção e definições de práticas e metodologias de desenvolvimento de projetos.

ALFIERI et al. (2020) propôs um modelo de fluxo de trabalho para a integração do projeto para fabricação e montagem no contexto italiano, aplicado a um processo baseado em BIM e a processos utilizados no Reino Unido e em Singapura. A análise crítica realizada focou nas possibilidades e limitações para

atender aos requisitos e atividades do DfMA. Os resultados obtidos nessa pesquisa demonstraram que a estrutura proposta é suficientemente enxuta e eficaz para permitir a implementação de DFMA não apenas na indústria da construção italiana. Ademais, as estruturas de processo internacionais mais avançadas tornaram o plano de gerenciamento de fabricação e montagem mais preciso, aumentando a qualidade dos elementos e evitando inconsistências de projeto.

TRESIDDER; WHITE (2018) investigaram o planejamento e coordenação da cadeia de suprimento aplicado a metodologia BIM em projetos utilizando elementos pré-fabricados. O uso dessa abordagem possibilitou a equipe de arquitetura desenvolver soluções de *design* que se adequassem à fabricação de elementos estruturais fora do canteiro de obra, por meio da colaboração antecipada dos fabricantes.

HASMORI et al. (2020) elaboraram um modelo para identificar fatores críticos de sucesso que influenciam a adoção do BIM em empresas de pré-fabricados. Foram entrevistados diversos profissionais de empresas de pré-fabricados de diferentes nacionalidades. Os autores identificaram que para as empresas atingirem nível de maturidade elevado na utilização de BIM é necessário que haja trocas de conhecimento e de modelos contendo informações suficientemente precisas entre os projetistas e os fabricantes, desde a fase inicial de projeto.

No caso da pesquisa de NATH et al. (2015) foi elaborado um novo fluxo de trabalho para projetos pré-fabricados a fim de aumentar a produtividade no canteiro de obra. Foi identificado, por meio de entrevistas com especialistas da área, restrições no fluxo de trabalho atual para a geração de desenhos pré-fabricados. Para resolver essas restrições um conjunto de elementos pré-moldados foram desenvolvidos como componentes paramétricos BIM, o que permitiu a geração automatizada de desenhos e cronogramas. Essa técnica de mapeamento e análise de fluxo de trabalho foi utilizada para identificar o tempo de processamento e o tempo de espera. Suas descobertas mostraram que se o fluxo de trabalho proposto for seguido, haverá uma melhoria geral da produtividade de aproximadamente 36% para o tempo de processamento e 38% para o tempo total de espera.

GBADAMOSI et al. (2019) desenvolveram um sistema de avaliação baseado em princípios de construção enxuta e DFMA para otimização dos projetos por meio de prototipagem virtual. As ferramentas de avaliações aplicaram abordagem

multiobjetiva e foram anexadas a *software* de projetos paramétricos, tais como Revit 2017 e Dynamo, para aprimorar a interoperabilidade do sistema e garantir a flexibilidade para os usuários. A lógica de avaliação proposta auxiliou os projetistas na seleção de materiais e elementos alternativos de construção para aumentar a eficiência das trabalhadores na obra e reduzir desperdícios de materiais. Uma limitação desse sistema é o fato dele não considerar toda a geometria da estrutura como coberturas, lajes, colunas, vigas e fundações, mas apenas o envelope da edificação.

Uma outra abordagem foi proposta por YUAN et al. (2018), onde eles introduziram os conceitos de projetar para fabricação e montagem em projeto de construção pré-fabricada e o combinam com o BIM. O processo de projeto paramétrico orientado para DFMA sugerido permite que o conhecimento profissional nos campos de fabricação e montagem possa ser usado durante o estágio de projeto conceitual de edifícios pré-fabricados. Para que isso ocorra foi proposto pelos autores uma equipe de arquitetura orientada ao DFMA composta por arquitetos, engenheiros estruturais, consultores fabris e técnicos de construção, de modo a evitar problemas durante a construção e aumentar a taxa de qualidade do projeto.

A pesquisa de BANKS et al. (2018) adotou princípios de padronização, simplificação e aproveitamento da construção em massa em todas as disciplinas de engenharia para oferecer melhorias na qualidade, sustentabilidade, segurança do programa e redução de custo. Uma torre residencial de 40 andares serviu de estudo de caso, onde 72% da estrutura e fachada são compostas por elementos pré-fabricados. Para acompanhar o progresso do projeto, desde a fábrica até a sua instalação, foi utilizado a etiqueta *Radio Frequency Identification* (RFID). A etiqueta permite o armazenamento de informações e pode ser integrado ao sistema de informações geográficas (*Geographic Information Systems* - GIS) e ao sistema de posicionamento global (*Global Positioning Systems* – GPS). Além disso, para garantir os padrões de qualidade e sustentabilidade, o projeto da superestrutura foi realizado com os recursos dos processos automatizados da fábrica.

HWANG et al. (2018) desenvolveram um método de pontuação do PPVC (*Prefabricated Prefinished Volumetric Construction*) para avaliar o uso de elementos pré-fabricados volumétricos em um determinado projeto, usando dados coletados com especialistas do setor AEC. Esses dados foram exportados para uma

ferramenta informatizada de suporte a decisão desenvolvida que auxilia projetistas a analisarem se o projeto é adequado para o uso de PPVC.

No estudo de FU; SHI (2019), eles elaboraram um método de troca de dados automatizado baseado em IFC (*Industry Foundation Classes*) para pontes pré-fabricadas. A ferramenta apresenta um método de medida 3D que atualiza os dados geométricos em tempo real para o modelo paramétrico BIM. Uma limitação da ferramenta é que no cenário atual ainda existem inconsistências na interoperabilidade entre IFC e os *softwares* BIM.

WANG et al. (2018) propuseram um método baseado em Modelagem de Informações da Construção e o Algoritmo Genético Aprimorado. O método consiste na utilização de algoritmo genético para procurar uma sequência de montagem ideal para projetos de edificações pré-fabricadas. Inicialmente um modelo paramétrico foi desenvolvido. As informações das famílias dos elementos contidas no modelo serviram como dados de entrada para os modelos matemáticos. Por meio da técnica de algoritmo evolutivo a pesquisa revelou soluções de sequência de montagem que foram posteriormente verificadas através de simulações visuais em *software* de modelagem paramétrica 3D.

O estudo desenvolvido por LEE et al. (2018) propõe um processo para integrar atividades de construtibilidade relacionadas ao trabalho temporário na fase de projeto em edifícios de concreto. O modelo organizou atividades de fabricação e montagem com base no tempo apropriado, considerando os fluxos de informações das atividades de projeto existentes. Como resultado, foi identificado que as relações de interdependência entre as atividades de projeto e construtibilidade ocorreram principalmente no estágio de desenvolvimento do projeto. No entanto, a avaliação quantitativa da eficácia da aplicação do processo proposto não foi totalmente investigada sendo necessária a verificação das atividades e processos propostos em termos de redução de trabalho, tempo e custo.

FADOUL et al. (2018) e KANNAN; SANTHI (2018) criaram uma estrutura de classificação construtiva para diferentes sistemas de fôrma que são comumente usados para a construção de edifícios residenciais de concreto armado. As APIs (*Application Programming Interface*) desenvolvidas para os *software* de modelagem paramétrico extraíram as informações de quantidade, forma e orientação dos elementos estruturais do modelo e as associaram a um conjunto de componentes e funções que contribuíram para os resultados da avaliação da

construtibilidade. As APIs combinaram um sistema de avaliação numérica e um sistema baseado em regras, permitindo abordagens quantitativas e qualitativas, facilitando a otimização do desempenho de montagem desde a fase inicial do projeto.

O artigo de TAURIANEN et al. (2015) avaliou aspectos críticos relacionados ao gerenciamento do processo construtivo. Um questionário foi elaborado para coletar informações a respeito das dificuldades encontradas por profissionais da indústria AEC na implementação da metodologia BIM em projetos envolvendo princípios de construção enxuta. Essa pesquisa se limitou a um número pequeno de entrevistas válidas. No entanto, os resultados encontrados comprovaram que o desenvolvimento de planos de execução BIM e a colaboração entre os participantes do projeto são fundamentais para potencializar os benefícios da metodologia BIM durante a elaboração do projeto.

IVSON et al. (2018) elaboraram um sistema de visualização em 4D automatizado em que o sequenciamento de tarefas e a simultaneidade espaço-temporal são imediatamente detectados. A ferramenta desenvolvida extraiu as informações de volume, quantidade e orientação dos elementos estruturais. Em seguida o usuário entrou com dados referentes a duração da obra e a área do canteiro de obra. A ferramenta reuniu essas informações e por meio de algoritmos genéticos simulou possibilidades de montagem. O sistema de visualização 4D desenvolvido pelos autores permitiu que o usuário identifique conflitos de montagem e auxiliou no desenvolvimento de soluções construtivas mais precisas e otimizadas.

O artigo elaborado por CHOI et al. (2015) sugere um processo de extração de quantitativos e um sistema dentro da estrutura do Open BIM para melhorar a confiabilidade da estimativa desses quantitativos no estágio inicial do projeto. Para melhorar a interoperabilidade entre os modelos foram utilizadas ferramentas de criação BIM compatíveis com o formato IFC. O resultado desse estudo indica que a utilização desse sistema permite melhorias nas estimativas e escolhas de projeto, além de ajudar na redução do custo, uma vez que 70-80% dos custos de construção são determinados pelas decisões dos projetistas nos estágios iniciais de projeto.

LEE; HAM (2018) propuseram um sistema automatizado de *layout* de edificações introduzindo elementos estruturais padronizados para reduzir o custo de fabricação. A metodologia possibilitou melhorias na eficiência operacional do *layout* na montagem e no trabalho de instalação no canteiro de obra. Os resultados

mostraram que a implementação desse sistema agiliza a produção de elementos dentro da fábrica e facilita a montagem desses elementos na obra.

Na pesquisa elaborada por GAO et al. (2018) um questionário foi usado para coletar informações sobre o nível de importância dos fatores que afetam a adoção do projeto para montagem e fabricação (DfMA) no setor privado de Singapura. Para participar da pesquisa os entrevistados precisavam estar envolvidos em projetos que utilizassem componentes pré-fabricados ou modulares e terem experiência em processos de gerenciamento e tomada de decisão. Foram validadas 30 entrevistas de uma base de dados que continha aproximadamente 120 entrevistados. O estudo mostrou que agilidade de construção dos elementos pré-fabricados, facilidade do gerenciamento do canteiro e integração das equipes de projeto foram os fatores identificados como principais benefícios oferecidos pela adoção dos princípios DFMA.

2.2.2.BIM e Planejamento de construções repetitivas

Os estudos que relacionam planejamento de construções repetitivas com a metodologia BIM enfatizam a capacidade do aprimoramento do processo construtivo e o auxílio à tomada de decisão durante o desenvolvimento do projeto visando convergir para soluções mais otimizadas e produtivas.

As pesquisas de HEIGERMOSER et al. (2019) e VARGAS; FORMOSO, (2020) abordam a criação de ferramentas que possibilitam a integração de simulação BIM 4D com sistemas de gerenciamento de construção. As ferramentas permitem dividir os projetos de construção em zonas de trabalho obtendo quantitativos e oferecem simulação de construção em 4D. Os autores concluíram que existe a necessidade da elaboração de uma interface de integração entre o planejamento e orçamento, o que resultaria em uma maior contribuição para apoiar a tomada de decisão dos projetistas em obras replicáveis.

FANG et al. (2016) , TOMAR; BANSAL (2019a) e ZHANG et al. (2015) apresentaram em seu estudos um sistema de localização que integra RFID e BIM. A etiqueta RFID permite o armazenamento de informações provenientes do BIM e o associa a um sistema de posicionamento global (GPS) para localizar materiais e estimar sua posição no canteiro. Portanto, isto possibilita que componentes sejam rastreados e importados para modelos virtuais na fase de projeto.

Como relatado por HAJDASZ (2015) o gerenciamento do fluxo de recursos é a principal questão que afeta toda a execução do processo construtivo. O estudo propõe uma ferramenta de apoio à decisão que se destina a auxiliar o gerenciamento de processos repetitivos de construção. Essa ferramenta consiste em uma série de métricas que conseguem identificar e categorizar o processo construtivo e possibilitam ao usuário a geração de alternativas de cenários construtivos. A abordagem proposta permite o planejamento de um fluxo de trabalho e a implantação contínua de recursos aproveitando o potencial de repetitividade do processo, aumentando as taxas de produtividade no canteiro.

Devido ao ambiente tecnológico e integrado trazido pela utilização da metodologia BIM as pesquisas de GÓMEZ-ROMERO et al. (2015), HONG et al. (2015) e KIM; CHO (2015) foram baseadas no desenvolvimento de ferramentas e métodos que analisam sequências de montagem e geração de informação. Os autores concluíram que as funcionalidades essenciais que uma ferramenta de construção integrada com BIM devem ser a melhor colaboração entre as partes interessadas do projeto, a identificação de materiais e a visualização do plano de construção.

Também foi possível identificar pesquisas de estratégias de aplicações da tecnologia BIM nas fases de planejamento e elaboração de cronograma. Em ELGHAISH; ABRISHAMI (2020) e KASSEM et al. (2015) são abordadas propostas de geração automática da programação de obra a partir das informações extraídas de modelos BIM. Os autores concluíram que o uso de sistemas otimizados e automatizados para elaboração de cronogramas geram benefícios na implementação de estratégias de construção no canteiro de obra, reduzindo assim o tempo de planejamento e potencializando a produtividade dos trabalhadores.

AREDAH et al. (2019) e NEVES et al. (2019) concluíram que o planejamento e o cronograma de projetos, incluindo a avaliação da sequência de montagem no canteiro, são facilitadas no ambiente BIM-4D quando comparado ao planejamento tradicional 2D. A alta eficiência e os benefícios obtidos com a utilização do BIM aliado ao modelo 4D afetam positivamente a coordenação do projeto, a detecção de conflitos e a validação do *layout* arquitetônico, ainda na fase inicial de projeto.

No estudo desenvolvido por IGWE et al. (2020) os autores identificaram que as ferramentas de planejamento 4D como Navisworks, não podem acomodar o

planejamento da área de trabalho ou capturar com precisão a evolução das áreas de trabalho em termos de localização e forma geométrica. Portanto, segundo essa pesquisa a definição de 4D-LOD (4D - *Level of Development*) torna-se essencial para futuros estudos de gerenciamento de cronograma, para fornecer uma simulação que consiga unir o modelo 3D da edificação com tarefas práticas e organizações de construção mais precisas.

Os artigos de JEONG et al. (2016) e TORRES-CALDERON (2019) apresentaram análises computacionais integrada à Modelagem de Informações da Construção (BIM) para prever a dinâmica da produtividade na fase de planejamento da construção. As ferramentas elaboradas permitiram utilizar informações diretamente do modelo BIM de maneira consistente como dados de entrada para suas simulações. As simulações realizadas foram capazes de preverem o número de dias necessários para execução de uma atividade, a capacidade de estocagem de materiais no canteiro de obra e extrair quantitativos precisos de materiais. As conclusões obtidas no estudo mostram que a estrutura desenvolvida facilita a previsão confiável da dinâmica da produtividade e pode contribuir para melhorar a confiabilidade do cronograma, alocação otimizada de recursos, economia de custos associados a tempo de esperas no canteiro e redução de desperdício de material.

KIM et al. (2016) desenvolveram uma plataforma de planejamento de segurança através de um *plug-in* em ambiente BIM. Os algoritmos computacionais na plataforma identificaram automaticamente riscos de segurança relacionados a atividades repetitivas em altura. O modelo tem o objetivo facilitar as comunicações antecipadas de segurança entre os participantes do projeto e identificar riscos à segurança que podem não ter sido percebidos pelos gerentes antes do início da construção.

No caso da pesquisa de SIGALOV; KÖNIG (2017) foi proposto um sistema que reconhece padrões de processos em cronograma de construção, baseados em BIM. A ferramenta apresenta um método recursivo apoiado em métricas de similaridade que identificam padrões de processo que serão posteriormente generalizados. Essa metodologia dá suporte à elaboração de cronogramas de construção automatizados para obras de edificações replicáveis em escala.

2.2.3.DFMA e Planejamento de construções repetitivas

TOKDEMIR et al. (2019) sugeriram um método de avaliação de risco de atraso para projetos que utilizam linha de balanço (em inglês *Line of Balance* – LoB). A LoB é um método de planejamento alternativo, capaz de identificar folgas de tempo ou espaço no sequenciamento de atividades de forma visual durante o planejamento de obras repetitivas. Um cronograma de LoB foi elaborado considerando a taxa alvo de entrega para o número necessário de horas de trabalho para cada atividade e taxas de aprendizado. Em seguida, cenários de risco foram definidos considerando as fontes de incerteza e vulnerabilidade das atividades, por meio da simulação de Monte Carlo.

O artigo de EROL et al. (2017) também aplica a metodologia de Monte Carlo para revelar os benefícios da aplicação de práticas de construção enxuta. As descobertas dos autores revelaram que os resultados dos métodos propostos podem permitir aos construtores tomarem decisões e formularem estratégias mais eficazes de montagem, fabricação e planos de contingência para a utilização de recursos em tarefas repetitivas.

TOMAR; BANSAL (2019b), avaliaram a utilização do sistema de informação geográfica (*Geographic Information Systems* - GIS) para considerar os efeitos do ambiente no cronograma de um projeto de construção repetitivo. As sequências de execução 4D e seus arredores foram desenvolvidos no GIS, vinculando o cronograma de um projeto com os componentes 3D relacionados. A utilização desse sistema ajuda a identificar erros lógicos de construção, atividades ausentes no cronograma, viabilidade espacial e a facilitar a montagem no canteiro de obra. O cenário idealizado pelos autores não corresponde ao nível tecnológico do GIS e nem a sua atual popularização no setor de AEC. Portanto, este estudo apresenta possibilidade futuras da implementação do BIM de forma conjunta com o GIS.

Na pesquisa exploratória desenvolvida por UNGUREANU et al. (2019) um modelo matemático foi desenvolvido para calcular o grau de qualidade dos planejamentos utilizando linha de balanço. Os indicadores de qualidade permitem uma rápida avaliação quantitativa dos cronogramas de LoB em nível global. O modelo foi validado por meio de um estudo de caso de obras repetitivas. Assim, os indicadores de qualidade contribuem para analisar e controlar dependências entre

custo e tempo, além de auxiliar na elaboração do planejamento construtivo em obras de edificações replicáveis.

AMMAR; ABDEL-MAGED (2018) abordaram o efeito do desenvolvimento da aprendizagem incorporado ao agendamento LoB tradicional. Foram implementados o modelo linear de aprendizado para avaliação do efeito. Os autores concluíram que o valor da economia de tempo do projeto depende dos valores da taxa de aprendizado e do número de unidades repetitivas. A economia de tempo observada na duração do projeto pode ser usada como uma margem de segurança para absorver atrasos subsequentes. Por outro lado, o planejador pode tentar relaxar certas atividades para levar o projeto à sua duração original. Isso envolve a redução do número de equipes em algumas atividades que usam mais de uma equipe, o que reduz essencialmente os custos diretos.

O artigo desenvolvido por GOUDA et al. (2017) apresentou uma ferramenta para resolver dilemas de restrição de recursos em projetos de planejamento linear. O modelo proposto utilizou um código do *Matrix Laboratory* (MATLAB) usando a teoria dos grafos como um algoritmo de busca para desenvolver cronogramas lineares através do método de linha de balanço. O usuário entra com informações relacionadas ao projeto, tais como data de início e término e número de unidades de repetição e a ferramenta elabora um cronograma. A metodologia proposta permitiu a redução do número de equipes empregadas em projetos de construção linear repetitiva por meio da formulação do roteamento ideal de equipes, facilitando a montagem no canteiro.

ZHANG et al. (2017) projetaram um questionário para coletar dados e identificar fatores críticos de fabricação e montagem para explorar a relação entre esses fatores e o fluxo de trabalho no canteiro. As hipóteses apresentadas foram baseadas em pesquisas anteriores e em um questionário com profissionais da indústria AEC para elaboração de uma estrutura de processo que ranqueia os fatores críticos construtivos de obras de edificações. A pesquisa mostrou que a identificação dos fatores críticos ajudou os gerentes de projeto a entenderem o fluxo de trabalho com maior facilidade e a tomarem medidas eficazes para melhorar a confiabilidade do fluxo de trabalho.

As pesquisas de SU; LUCKO (2016) e IOANNOU; YANG (2016) abordaram a criação de ferramentas que possibilitam a integração de linha de balanço (LoB) com princípios de montagem e construção enxuta para elaboração

de cronogramas em obras repetitivas. As ferramentas propiciaram o gerenciamento antecipado do cronograma em obras complexas de edificações replicáveis em escala. Os resultados obtidos revelaram que o planejamento antecipado por meio do método da linha de balanço permite a elaboração de cronogramas que potencializam a montagem e fabricação de elementos no canteiro de obra.

XUE et al. (2018) desenvolveram um modelo de avaliação de análise fatorial, dividido em modelo de análise fatorial (*Factor Analysis Model* - FAM) e modelo de avaliação abrangente (*Comprehensive Evaluation Model* - CEM) para otimizar o gerenciamento de custos de estruturas pré-fabricadas. O FAM foi usado para identificar o efeito das variáveis relacionadas ao alto custo de capital da pré-fabricação, enquanto o CEM foi usado para avaliar a porcentagem de pré-fabricação do projeto. Neste estudo os autores identificaram que os custos de material e mão de obra tiveram impactos significativos no custo de produção (14,76%). Além disso, a pesquisa revelou o potencial do *design* padronizado e a simplificação do projeto para reduzir o custo de capital e ajudar os gerentes a avaliarem o nível de pré-fabricação de um projeto.

A ferramenta automatizada elaborada por SACKS et al. (2017) consegue medir tendências no fluxo de produção de um projeto em um intervalo de tempo determinado pelo usuário. O índice de fluxo de construção é uma métrica desenvolvida pelos autores que possibilita a avaliação do planejamento construtivo por meio da pontuação de critérios construtivos extraídos da literatura. Esse índice foi proposto para que os construtores pudessem avaliar a qualidade de seus planos de construção, medir e comunicar o status da qualidade do fluxo às demais equipes de projeto.

No estudo que avalia o gerenciamento do fluxo e trabalho durante o processo de projeto de INDIRA; VENKATA JYOTHSNA (2017) os autores identificaram que métodos de plano de trabalho baseados em técnicas de construção enxuta fornecem uma melhor produtividade e gerenciamento da cadeia de suprimentos. Essa prática diminui as atividades de execução e à geração de resíduos durante a fase de construção.

NAOUM (2016) identificou por meio de sua pesquisa que os fatores mais significativos que influenciam a produtividade de trabalhadores no canteiro de obra são associados às atividades de pré-construção. Esses fatores estão relacionados com a facilidade de construção do projeto, planejamento antecipado por meio de

cronogramas assertivos e comunicação entre os atores do projeto na fase de desenvolvimento do mesmo.

No trabalho de NAJAFI; KONG (2016) um modelo em Redes Neurais Artificiais foi proposto para prever os tempos de instalação dos elementos pré-moldados em edificação similares. Foram identificados por meio da análise de regressão múltipla fatores significativos que influenciam a produtividade e que serviram como dados de entrada do modelo de redes neurais. O desempenho do modelo desenvolvido mostrou sua precisão na previsão dos tempos de instalação de diferentes componentes pré-moldados, o que confirmou a adequação do modelo para ser usado por profissionais durante o gerenciamento de construção.

3 Referencial teórico

A baixa produtividade registrada nas últimas décadas no setor da construção civil está relacionada à falta de implementação adequada de tecnologias no desenvolvimento de projetos e no processo construtivo. No entanto, esse cenário vem sofrendo mudanças com o grande investimento de capital de empreendedores em soluções digitais em toda a cadeia de valor da construção (HEIGERMOSER et al., 2019).

Novas estratégias, como a implementação do *Building Information Modeling* (BIM), de *Lean Construction*, de princípios de projetar para fabricação e montagem e planejamento construtivo são necessários para aumentar a eficiência no canteiro de obra, evitar retrabalhos e gastos adicionais no projeto (HAMDI; LEITE, 2012; SACKS et al., 2010).

Este capítulo apresenta o referencial teórico e aborda os principais princípios, métodos e ferramentas que são utilizados no desenvolvimento deste estudo.

3.1. Building Information Modeling

A metodologia BIM propicia a troca de informações entre os especialistas da indústria AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) durante as diferentes fases de projeto. O BIM fornece ferramentas que permitem o armazenamento e exibição de dados e documentos inerentes ao projeto, à construção e à operação de forma digital. Assim, à medida que o projeto se desenvolve, a qualidade das informações associadas a ele é potencializada.

A fim de melhorar o processo construtivo, os dados necessários para dar prosseguimento a uma determinada atividade de projeto devem possuir qualidade de informação e estarem disponíveis quando forem requisitados pelos projetistas e consultores. Para que isso aconteça, é necessário que haja um aperfeiçoamento na qualidade e no processo de troca de informação entre os participantes do projeto.

O método colaborativo que o BIM oferece permite incorporar análises de planejamento, custo e construtibilidade durante o processo de tomada de decisão

para garantir um projeto otimizado. A elaboração do plano de execução BIM (PEB) se faz necessária para integrar o BIM ao processo de entrega de projeto (COMPUTER INTEGRATED CONSTRUCTION RESEARCH GROUP, 2010).

Desse modo, um PEB de um projeto detalhado deve definir o fluxo do processo de trabalho e de tarefas, as trocas de informações e conhecimentos entre os participantes do projeto, o escopo do empreendimento, bem como descrever a infraestrutura necessária da empresa. Este documento garante que todas as partes estejam cientes das oportunidades e responsabilidades associadas ao processo de entrega do projeto dentro da metodologia BIM (COMPUTER INTEGRATED CONSTRUCTION RESEARCH GROUP, 2010).

A ferramenta que propicia um entendimento comum dos vários processos envolvidos no projeto e que descreve quais informações associadas a estes processos devem ser comunicadas entre os participantes é denominada manual de entrega de informações (IDM – *Information Delivery Manual*), normatizado pela ISO 29481-1:2016.

As principais atribuições de um mapa de processo são descrever a sequência lógica das atividades dentro de uma temática específica e garantir que os dados relevantes sejam consumidos e produzidos de maneira precisa e no momento exato. Este conjunto de processos de negócio é denominado MVD (*Model View Definition*) (BUILDINGSMART, 2010).

A fim de corroborar os benefícios do mapa de processo em um IDM é fundamental compreender e definir as etapas e atividades que compõe o processo bem como as informações necessárias na comunicação entre as partes e os atores envolvidos no desenvolvimento do projeto.

O *Business Process Modeling Notation* (BPMN) é frequentemente utilizado em grandes projetos na especificação de processos de negócio devido a diversidade de ferramentas disponíveis para seu desenvolvimento, bem como pela facilidade de compreensão do mapa de processo. Devido aos seus benefícios, o BPMN é a abordagem usualmente utilizada para desenvolver um mapa de processos dentro de um IDM (BUILDINGSMART, 2010; ISO 29481-1:2016).

A capacidade de conectar profissionais por meio de colaboração interdisciplinar é o principal diferencial da metodologia BIM quando comparada à prática tradicional. Embora a troca de informações seja útil, sua quantidade e maturidade são essenciais para indicar o desenvolvimento do modelo.

Segundo GERRISH et al. (2017) medir a quantidade e qualidade das informações em estágios-chave do projeto pode ser alcançado por meio do uso do conceito de Nível de Desenvolvimento (LOD - *Level of Development*). O Instituto Americano de Arquitetos e Empreiteiros Gerais Associados da América (2019) definiu uma escala arbitrária de 100 a 400 que é usada para indicar a quantidade de informações no modelo, como ilustrada na Tabela 5. Nesta tabela, o termo Elemento do Modelo é usado para se referir aos componentes de um edifício (AIA; ACG, 2019).

Tabela 5 - Estágio do projeto vs Nível de Desenvolvimento (Adaptado de AIA e ACG, 2019).

Estágios do Projeto	Nível de Desenvolvimento
Projeto Conceitual Inicial	LOD100 – O Elemento do Modelo pode ser representado graficamente no Modelo com um símbolo ou outra representação genérica
Projeto Conceitual	LOD200 – O Elemento do Modelo é representado graficamente no Modelo como um sistema, objeto ou montagem genérico com quantidades aproximadas, tamanho, forma, localização e orientação.
Projeto Detalhado Inicial	LOD300 – O Elemento do Modelo é representado graficamente no Modelo como um sistema, objeto ou montagem específico em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação.
Projeto Detalhado	LOD350 – O Elemento do Modelo é representado graficamente no Modelo como um sistema, objeto ou montagem específico em termos de quantidade, tamanho, forma, localização, orientação e interface com outros sistemas de construção.
<i>As Built</i>	LOD400 – O Elemento do Modelo é representado graficamente no Modelo como um sistema, objeto ou montagem específico em termos de tamanho, forma, localização, quantidade e orientação com informações detalhadas, de fabricação, montagem e instalação.

3.2. Edificações replicáveis em escala

De acordo com OLIVEIRA et al. (1998a) obras de edificações replicáveis em escala abrangem empreendimentos como conjunto de galpões, complexos de escolas, condomínios residenciais multifamiliares e prédios comerciais de escritórios. Pode-se dizer que essas obras são caracterizadas por uma unidade de repetição, que pode ser uma casa, um edifício, um pavimento. Cada uma das unidades de repetição pode ser desmembrada em uma sequência de processos que serão repetidos em cada unidade do projeto.

Adicionalmente, O'CONNOR et al. (2015) exaltaram que empregar industrialização modular em projetos com poucas unidades e pouca padronização implica em custos maiores e maiores perdas de produtividade no canteiro de obra. Tal cenário se inverte à medida que se aumentam as unidades de repetição e padronização do *layout* arquitetônico e elementos estruturais em uma edificação.

A natureza repetitiva dessas obras e a necessidade do aumento da produtividade no canteiro de obra têm impulsionado o desenvolvimento de diversas técnicas e estratégias de planejamento para este tipo de projeto em diferentes níveis. No nível macro, os gerentes de planejamento e de construção estão cada vez mais atentos com a organização do projeto, sequência de atividades e controle. No nível micro, os projetistas estão interessados nos passos necessários para realizar as atividades que foram delineadas para completar uma unidade (MENDES JUNIOR, 1999).

Segundo SANTOS (2008), o planejamento na construção civil tem um caráter muito dinâmico que inclui o plano diretor de toda obra e as estimativas de custo e orçamento. O planejamento é um instrumento de apoio à decisão, que permite a obtenção de soluções sempre mais eficientes e reduzem as probabilidades de ocorrerem erros, retrabalhos, desperdícios e atrasos durante a elaboração do projeto. Devido ao acirramento da concorrências e prazos mais apertados de entrega de projeto, o planejamento construtivo vem ganhando cada vez mais importância para garantir obras produtivas e com qualidade.

3.2.1. Planejamento de construções repetitivas

O planejamento é um processo de tomada de decisão que auxilia a compreensão dos objetivos do projeto. Este processo produz informações e

conteúdo que são referência para controlar e monitorar a execução de empreendimentos (VARGAS; FORMOSO, 2020). De acordo com a literatura, os métodos tradicionais de planejamento e controle de produção aplicados na indústria de construção possuem limitações.

Um dos métodos tradicionais de planejamento é o Método do Caminho Crítico (em inglês *Critical Path Method* - CPM). Embora seja um método amplamente difundido na gestão de empreendimentos, alguns pesquisadores perceberam falhas no balanceamento de equipes e continuidade do uso de recursos em empreendimentos replicáveis em escala (BENJAORAN et al., 2015; HAMZEH et al., 2015).

De acordo com KOSKELA et al. (2014) os métodos de planejamento tradicionais não costumam considerar a variabilidade do processo construtivo, as interferências entre processos e as incertezas na disponibilidade de recursos, o que resulta em uma defasagem no tempo de construção do empreendimento. Ademais, os métodos de planejamento e controle da produção (PCP) vem recebendo críticas de alguns autores por não darem o devido suporte a natureza repetitiva de alguns empreendimentos (HARRIS; IOANNOU, 1998; HEGAZY; KAMARAH, 2008). Muitas vezes esses métodos acabam não permitindo aos projetistas visualizarem os fluxos de trabalho e processos de forma adequada em obras de edificações replicáveis.

Atualmente, os empreendedores de projeto de construção civil estão cada vez mais preocupados em melhorar o desempenho em termos de tempo, custo e produtividade no processo de entrega do projeto (LUCKO et al., 2014). Nesse contexto, a implementação de métodos de PCP, que se contrapõe às práticas tradicionais do setor da construção, podem facilitar o planejamento construtivo e potencializar os desempenhos almejados pelos empreendedores (VARGAS; FORMOSO, 2020).

A linha de balanço (LoB) foi introduzida como um método alternativo ao CPM com objetivo de facilitar o planejamento de operações repetitivas. O método foi desenvolvido inicialmente para processos de produção industriais e posteriormente foi adaptado para o planejamento e controle de obras repetitivas de edificações e de infraestrutura (IOANNOU; YANG, 2016).

A principal vantagem do desenvolvimento de cronogramas com linha de balanço é o seu formato gráfico simples para representar o fluxo de produção ao

longo das atividades desempenhadas no projeto (LUCKO; GATTEI, 2016). A Figura 3 mostra o gráfico da linha de balanço. O eixo horizontal do gráfico indica o tempo decorrido para a execução das unidades de repetição, cuja quantidade é plotada no eixo vertical (DAMCI et al., 2013). Sua representação na forma de uma linha reta permite obter as informações necessárias sobre taxa de produção e duração das tarefas (BIOTTO et al., 2017).

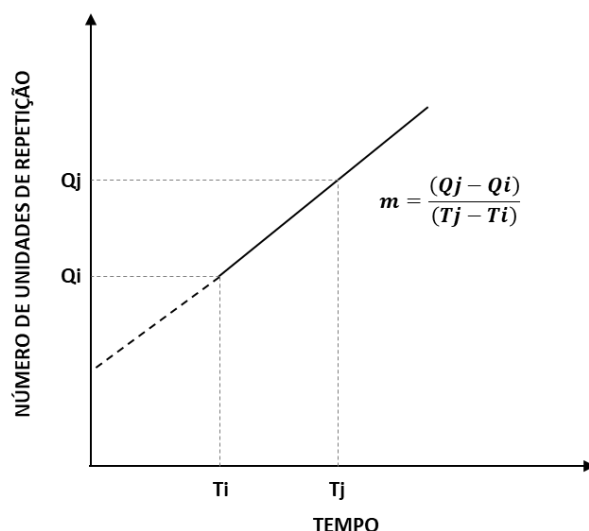


Figura 3 – Gráfico da linha de balanço (Adaptado de DAMCI et al., 2013).

A inclinação da linha que une os horários de início e fim da atividade repetitiva é denominada taxa de produtividade (ritmo de trabalho), seu cálculo é exposto na Equação 1 (DAMCI et al., 2013). Desse modo, o ritmo de trabalho é calculado a partir da relação entre unidades de repetição e tempo.

$$m = \frac{Q_j - Q_i}{T_j - T_i} \quad (1)$$

Onde:

- m , é a taxa de produtividade;
- Q_i e Q_j são o número de unidades de repetição;
- T_i e T_j são tempos decorridos entre o início e fim de uma atividade, respectivamente.

De acordo com LUCKO et al. (2014) esta abordagem permite reconhecer, conceber e utilizar conceitos importantes ao PCP, tais como atividades concluídas, folgas de tempo ou espaço, sequenciamento de atividades e sincronia das tarefas.

Através das linhas de balanço, os construtores são capazes de elaborar um planejamento com fluxo de produto e trabalho contínuos.

Segundo MENDES JUNIOR (1999) o método LoB pode ser empregado tanto na fase inicial do projeto, quanto durante o controle da obra. Quando essa abordagem é aplicada a nível de planejamento de longo prazo, a linha de balanço permite obter uma visão global das informações referentes aos locais, ao fluxo de trabalho e a interferências de projeto (LUCKO et al., 2014).

3.2.2. Curva de Aprendizagem

De acordo com AGNOLETTI (2010) outra particularidade das obras de edificações replicáveis em escala é o efeito aprendizado, cuja ocorrência propicia aumentos expressivos de produtividade devido a repetição da execução na obra.

No âmbito do planejamento da obra, o tempo dispendido na primeira execução de um serviço é considerado sempre como 100%. A partir, da primeira repetição ocorre uma redução do tempo de execução, decorrente da ocorrência do aumento da produtividade. Este fenômeno vai se repetindo com o aumento das repetições. No entanto, após determinado número de repetições o tempo despendido no desenvolvimento de uma atividade vai se estabilizando (GEHBAUER et al., 2002).

Segundo LEITE et al. (2004) existem várias razões que explicam o efeito aprendizagem, dentre as quais se destacam: familiarização com o trabalho; melhoria da coordenação de equipes e equipamentos; melhoria no gerenciamento para a execução das tarefas e desenvolvimento de técnicas e metodologias mais eficientes.

O efeito do aprendizado é representado graficamente pela curva de aprendizagem, onde após o operário já ter realizado diversas vezes a mesma tarefa, o mesmo adquire maior agilidade em sua execução. No entanto, esse fenômeno só é possível se o processo de produção for contínuo e repetitivo. Assim, o processo de produção deve ser executado por uma mesma equipe de funcionários sem sofrer interrupções e alterações significativas no método executivo do serviço (LEITE et al., 2004).

A curva de aprendizado apresenta-se como um fenômeno capaz de monitorar o desempenho de trabalhadores submetidos a tarefas repetitivas. Através das curvas é possível analisar e programar tarefas produtivas, reduzir perdas decorrentes da

inabilidade do trabalhador, as quais são identificadas sobretudo nas primeiras etapas de execução das tarefas. A ferramenta também permite a adequação e alocação de tarefas as equipes de construção, a fim de aumentar a eficiência construtiva no canteiro de obra, ainda na fase de projeto (AGNOLETTI, 2010).

3.3.Construtibilidade

A indústria da construção é frequentemente caracterizada por apresentar problemas de produtividade associados a atrasos na construção (HASMORI et al., 2020). O progresso do processo construtivo pode ser afetado pela complexidade das edificações e por fatores relacionados à transferência de informações, conhecimento e responsabilidades entre as partes envolvidas no projeto. Por consequência, o processo construtivo pode sofrer aditivos de custo ou degradação da qualidade devido a inconsistências de projeto (HASMORI et al., 2018).

A fim de potencializar a produtividade durante o processo de construção, a Associação de Pesquisa e Informação da Indústria da Construção (CIRIA) definiu o conceito de construtibilidade como a prática a ser adotada pelos projetistas para facilitar a construção de edifícios (CIRIA, 1983). Mais tarde, os Institutos da Indústria da Construção dos EUA e da Austrália elaboraram um novo conceito que aprimora a capacidade de construção e estende a prática de compartilhamento de conhecimento para todo o ciclo de vida da construção (CII, 1986).

No entanto, segundo CONTRADA et al. (2019) os conceitos de construtibilidade ainda não são utilizados com sucesso nos modelos convencionais de gerenciamento de projeto. Atualmente as abordagens encontradas na literatura se baseiam no desempenho associada às técnicas de tomada de decisão na fase de concepção do projeto. Contudo, essas abordagens geralmente ignoram os métodos de gerenciamento de projeto (KANNAN; SANTHI, 2018; ZOLFAGHARIAN; IRIZARRY, 2017).

Assim, o Instituto de Pesquisa de Construtibilidade da França propôs em 2010 princípios construtivos que integram abordagens de desempenho e métodos de gerenciamento de processos. Nesse contexto, a construtibilidade aliada a metodologia BIM fornece uma estrutura capaz de antecipar esforços das partes interessadas e definir requisitos de desempenho com análises funcionais das necessidades do edifício e do usuário final (CONTRADA et al., 2019).

3.3.1.Princípios construtivos

A partir da revisão da literatura, são expostos nesta subseção os princípios de construtibilidade no projeto do empreendimento e no processo de construção. Estes fatores são avaliados quanto à contribuição na promoção de melhorias das atividades e no fluxo do processo construtivo. Entretanto, é importante salientar que os princípios apresentados abaixo não pretendem delimitar o escopo de construtibilidade, de modo que pode haver outros conceitos com potencial para impulsionar a construtibilidade que não tenham sido contemplados (CHOI et al., 2020; O'CONNOR et al., 2015; TAURIANEN et al., 2016).

- Simplificar o projeto pela redução do número de partes e passos: simplificar com a finalidade de melhorar a eficiência do processo produtivo e com a redução do número de etapas no fluxo de informações entre as partes interessadas.
- Padronizar elementos do projeto e do processo construtivo: compreende o amplo uso de componentes, métodos e processos com constância e repetição.
- Promover acessibilidade de materiais, equipamento no canteiro de obra: o projeto do empreendimento e o processo de construção devem considerar a acessibilidade de materiais e equipamento com o propósito de evitar atrasos no progresso de atividades, redução da produtividade dos trabalhadores e retrabalhos.
- Facilitar construção sob diferentes condições climáticas: minimizar interferências associadas a condições climáticas (chuva, temperaturas extremas) na produtividade de serviços conduzidos ao ar livre.
- Otimizar os processos construtivos: introduzir melhorias no projeto do processo de construção.
- Minimizar o tempo de percepção, decisão e manipulação das operações de montagem: propiciar discriminação visual utilizando diferentes formas e tamanhos de peças e componentes; promover transferência de habilidades adquiridas anteriormente pelos trabalhadores na montagem de novos produtos.

A implementação desses conceitos na fase de desenvolvimento do projeto conceitual pode promover vantagens construtivas e evitar custos adicionais referentes a inconsistências no canteiro. A principal motivação para simplificação do projeto e do processo é reduzir a complexidade, resultando em um aumento da confiabilidade e da qualidade do empreendimento (O'CONNOR et al., 2015).

Segundo O'CONNOR et al. (2014) a padronização de elementos do projeto proporciona o aumento da construtibilidade. Uma das vantagens associada a este fato é o efeito aprendizado dos trabalhadores devido a repetição das operações no canteiro. A padronização de elementos do projeto também abre precedente para a utilização de sistemas construtivos do tipo pré-fabricado. Posto que a viabilidade do uso desses sistemas, sob a ótica econômica está relacionada ao uso de grandes quantidades de componentes idênticos que justifiquem a produção em larga escala (O'CONNOR et al., 2015).

3.3.2. Abordagens para consideração de construtibilidade

As abordagens apresentadas nessa subseção mostram como informações de construtibilidade podem ser disponibilizadas para membros envolvidos no desenvolvimento do empreendimento. Esta seção também apresenta métodos e análises construtivas descritos na literatura com a finalidade de observar práticas e tendências que possam auxiliar a presente pesquisa.

A revisão da construtibilidade do projeto é uma abordagem que geralmente é realizada a partir de projetos detalhados, e pode ser realizada através de uma lista de verificação. Essa revisão verifica o projeto em relação a aspectos de acurácia, compatibilidade com restrições do empreendimento, sistemas construtivos empregados, acesso ao canteiro e sequência de construção. Uma limitação desta abordagem é que as sugestões que aparecem durante a revisão da construtibilidade implicam em retrabalho e gastos extras (NARLOCH, 2015). Por isso, nesta pesquisa, a implementação dessa lista de verificação é considerada ainda na fase de concepção de projeto, a fim de reduzir as inconsistências e evitar retrabalhos.

Outra abordagem construtiva encontrada na literatura é o Sistema de Avaliação de Construtibilidade (CAS - *Constructability Appraisal System*). Esse sistema foi desenvolvido pela *Building and Construction Authority* (BCA) de Singapura como um meio de medir o potencial impacto dos sistemas e tecnologias

construtivas na produtividade do canteiro de obra. Esta abordagem resulta em um índice de construtibilidade que é obtido somente a partir de dados presentes no projeto.

O CAS se baseia em desempenho com características flexíveis permitindo aos construtores atenderem a requisitos construtivos com soluções mais econômicas. Os princípios de construtibilidade avaliados são subdivididos nas seguintes áreas de obras: estruturais, arquitetônicas, mecânicas, elétricas e hidráulicas, e nas práticas do local (BCA, 2017).

A abordagem CAS promove um uso mais amplo de metodologias e tecnologias de construção que ajudem a minimizar demandas por mão de obra no canteiro de obra (BCA, 2017). Assim, projetistas e consultores devem se atentar a implementação de processos de construção mais eficientes em mão de obra afastando-se dos métodos de construção tradicionalmente trabalhosos.

O sucesso dessa abordagem é atribuído por não exigir mudanças na estrutura organizacional da indústria AEC em termos de contratos e responsabilidades. Ademais, o método CAS fornece como resultado um valor numérico que pode ser calculado de forma rápida e simples.

3.4. Projetar para fabricação e montagem

Tradicionalmente, o conceito de projetar para fabricação e montagem (DFMA) foi aplicado na indústria automotiva e de produtos de consumo, pois estas indústrias precisavam desenvolver de forma eficiente produtos de alta qualidade em grandes quantidades. Desse modo, ao simplificar o projeto de um produto, é possível fabricá-lo e montá-lo de maneira mais eficiente, no menor tempo e com menor custo (YUAN et al., 2018).

Durante o estágio inicial de planejamento e concepção do projeto, é de fundamental importância tomar decisões guiadas para aumentar a eficiência da produção (GBADAMOSI et al., 2019). O sistema de orientação de um projeto de engenharia para fabricação e montagem considera a simplificação do produto, a integração de materiais e processos econômicos de projeto com objetivo de alcançar a fabricação e montagem ideais (BOOTHROYD et al., 2004).

A aplicação da abordagem DFMA é relativamente nova no setor da construção civil e exige mudanças na relação entre projeto e construção. Essas

mudanças fazem com que os projetistas se concentrem nos métodos de construção, entrega e no planejamento logístico da montagem dos componentes durante a elaboração de projeto (BCA, 2016).

A indústria de manufaturas pode ser mais eficiente do que a da construção civil, mas na literatura existem tentativas de otimizar a construção por meio da avaliação do projeto quanto a construtibilidade (ZOLFAGHARIAN; IRIZARRY, 2017). O'CONNOR et al. (2014) e KANNAN; SANTHI, (2013) propõem a utilização de conceitos como padronização de peças, pré-fabricação, transporte, instalações, especificações e revisões para promover melhorias na eficiência da construção.

A partir da revisão da literatura observou-se uma sinergia entre os princípios construtivo apresentados na seção anterior e os conceitos de DFMA que serão abordados neste tópico.

Sendo assim, a adoção de princípios de projetar para fabricação e montagem nos estágios iniciais de projeto pode colaborar na elaboração de empreendimentos com *layout* mais otimizados e projetos com maior facilidade construtiva. Esses conceitos aliados a tecnologias digitais no setor da construção podem aprimorar a tomada de decisão ainda na fase de desenvolvimento do projeto conceitual (BCA, 2016, ZHANG, 2016).

3.4.1.Princípios de fabricação e montagem

O conceito de projetar para fabricação e montagem surgiu a partir da união de dois princípios da indústria, *Design for Manufacturability* (DFM) e *Design for Assembly* (DFA). O DFM é um método que envolve diretrizes a serem consideradas no desenvolvimento do projeto, cujo objetivo é facilitar a produção de um produto ou componente. Por outro lado, o DFA consiste no esforço para integrar melhores práticas de montagem pela simplificação do projeto (GAO et al., 2019).

Esta pesquisa define as regras de *design* que melhoram a fabricação e montagem das edificações e que flexibilizam os projetos com base na revisão da literatura. Os princípios são descritos abaixo:

- minimizar o número total de peças aumenta a confiabilidade, reduz os custos relacionados a compra e estoque, e simplifica a montagem;

- usar peças padronizadas reduz os custos relacionados a compra e estoque, reduz os prazos de entrega e aumenta a confiabilidade;
- usar o mínimo de tipos e quantidades materiais diferentes simplifica os processos de fabricação;
- utilizar conjuntos pré-fabricados garante a qualidade do elemento e suas dimensões;
- minimizar o uso de peças frágeis evita que elas sejam danificadas no processo de transporte e construção.

Além disso, recomenda-se que os tipos e quantidades de componentes e conectores sejam minimizados para simplificar o processo de fabricação e montagem. A introdução de conceitos DFMA e o uso de elementos industrializados é incentivada durante o desenvolvimento do projeto neste estudo para ampliar a produtividade dos trabalhadores dentro do canteiro de obra (AZIZ; HAFEZ, 2013).

3.4.2. Planejamento para fabricação e montagem

O projeto de fabricação e montagem de edifícios exige que haja um esforço conjunto da equipe de projetistas e de especialistas em construção desde o estágio de projeto, assim como na definição de estratégias construtivas, garantindo a eficiência no canteiro de obra (GBADAMOSI et al., 2018). A singularidade dos processos construtivos e a fragmentação dos processos dentro da indústria da construção civil fazem com que a utilização de técnicas tradicionais de projeto seja inapropriada para essa abordagem. Tal utilização resultaria em avaliações tardias de projetos, métodos construtivos e no armazenamento de documentos em diferentes formatos de dados (BARBOSA et al., 2020).

Tecnologias orientadas a dados, como o *Building Information Modeling* (BIM), aprimoraram a tomada de decisões em estágio inicial por meio de visualização avançada de dados, detecção de conflitos e retirada de quantitativos de material (AKINADE et al., 2015; MAHAMADU et al., 2017).

A aplicação da metodologia BIM pode facilitar o armazenamento, o acesso e o uso de informações para promover melhorias contínuas dos sistemas de avaliação e otimização de projetos (AKINADE et al., 2015; DAS; KANCHANAPIBOON, 2011; TAURIAINEN et al., 2016). O objetivo fundamental da adoção do BIM em projetos que elaboram um planejamento construtivo é aprimorar o acesso a

informações a partir da coordenação, colaboração e gerenciamento de informações entre os atores envolvidos no processo (GRILO; JARDIM-GONCALVES, 2010).

A eficiência da otimização dos projetos depende da qualidade de informações sobre as quais as decisões de projeto são tomadas. Assim, os princípios do DFMA aliados à capacidade do BIM de capturar e fornecer informações pode potencializar considerações iniciais de projeto com foco na eficiência da fabricação e montagem na obra (GBADAMOSI et al., 2018).

4

Método de pesquisa

Este capítulo apresenta o manual de entrega de informações proposto, descreve o contexto do conjunto de edifícios utilizados no experimento, indica todas as considerações para realização das análises de planejamento, econômicas e construtivas, bem como lista as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento das referidas avaliações.

4.1.Information Delivery Manual (IDM)

O IDM desenvolvido neste capítulo mapeia a troca de informações necessárias entre os atores durante a fase de concepção para promover um projeto de edificações replicáveis em escala de concreto armado.

O mapa de processo proposto leva em consideração a utilização de conceitos de projetar para fabricação e montagem, incorporação de elementos pré-fabricados, estudos de planejamento e análise construtiva.

A primeira hipótese para o desenvolvimento do mapa de processo foi a definição do requisito do cliente, que consiste em realizar um projeto que envolva a construção de duas ou mais edificações semelhantes. A fase de projeto mapeada começa pela solicitação do cliente. Assim, para que se alcance tal objetivo é necessário que durante o desenvolvimento do projeto conceitual arquitetônico exista uma colaboração da equipe de construção para determinar a viabilidade das opções de projeto no contexto de planejamento, custo e construtibilidade.

Dessa forma, o IDM apontado contém um fluxo de informação e conhecimento que pode ser utilizado por instituições públicas e empresas privadas de médio a grande porte que tenham como propósito desenvolver empreendimentos de edificações replicáveis em escala em um ambiente BIM, considerando técnicas de planejamento e conceitos de construtibilidade.

A seguir são apresentados os atores envolvidos no mapa de processo sugerido. Suas principais atribuições são definidas com base em conhecimentos extraídos da

revisão da literatura, entrevistas com especialistas da área e discussões com grupo de pesquisa.

Cliente: corresponde a instituições públicas, privadas ou um indivíduo que contrate o serviço de empresas ou projetistas que desenvolvam um projeto de edificações replicáveis em escala de concreto armado. Dentre as principais atribuições do cliente estão a delimitação dos requisitos de projeto, revisões e aprovação de uma opção de proposta apresentada pela equipe de projeto.

Equipe de projeto: equivale a um grupo de pessoas em um escritório ou setor de projeto de uma empresa contratada para elaborar o projeto conceitual arquitetônico e que possua conhecimento de comportamento estrutural. Esta equipe é responsável por desenvolver o projeto conceitual arquitetônico que atenda aos requisitos solicitados, pelo lançamento inicial da estrutura e por sugerir a inclusão do conceito de fabricação e montagem do projeto no canteiro de obra. Além disso, esta equipe também é responsável pela elaboração das alternativas de projeto que serão analisadas pela equipe de construção.

Gerente de Projeto BIM: dependendo da complexidade e magnitude do projeto pode ser um indivíduo ou uma equipe de gerentes que possua expertise em tecnologia da informação (TI). Uma das responsabilidades desse ator é elaborar um plano de execução BIM (PEB) que esteja alinhado ao contrato acordado entre o cliente e as empresas. O PEB deve conter informações a respeito dos *softwares*, plataformas e outros requisitos tecnológicos a serem utilizadas durante o projeto, definições de diretrizes de modelagem e execução do controle de qualidade do projeto. Ademais, este ator é responsável por coordenar as informações trocadas entre as partes interessadas, garantindo a transparência das mesmas e a interoperabilidade dos modelos.

Equipe de construção: corresponde a um grupo de pessoas de um escritório ou um setor da empresa especializado em planejamento e construtibilidade. Esta equipe é responsável por avaliar a facilidade de montagem e fabricação de um projeto, analisar as melhores técnicas construtivas, avaliar o custo e cronograma de implementação dos cenários apresentados pela equipe de projeto.

4.1.1. Mapa de processo

O mapa de entrega de informação apresentado nesse capítulo se baseia em técnicas BPMN. Nesta abordagem os diferentes tipos de entidades envolvidos no processo descrito são representados por meio de piscinas. Estas piscinas podem ser subdivididas em raias, que são utilizadas para representar diferentes departamentos dentro desta mesma entidade. Dessa maneira, a esquematização do IDM possibilita o mapeamento do fluxo de trabalho de um setor ou entidade para outra, ou seja, de uma piscina para outra.

No IDM desenvolvido as piscinas foram usadas para representar o cliente, os processos de projeto e os processos de consultoria. Dentro da piscina do processo de projeto existem duas raias que são representadas pela equipe de projetos e pelo gerente de projetos BIM, responsáveis pelo desenvolvimento do projeto solicitado pelo cliente. A piscina do processo de consultoria tem apenas uma raia que é representada pela equipe de construção. Este ator recebe informações específicas que são compartilhadas pelo gerente de projetos BIM para elaborarem um relatório técnico das opções de projeto.

Um evento é iniciado ou finalizado dentro das piscinas ou raias e é representado por meio de círculos, verde (início) e vermelho (fim). As tarefas mapeadas nesse IDM são retratadas por meio de retângulos e as informações geradas através destas aparecem como uma folha de papel. O curso do fluxo de trabalho é definido por setas cheias e tracejadas que se subdividem em rotas alternativas que dependem de tomada de decisões (losangos) (BUILDINGSMART, 2010).

O mapa de processo completo é apresentado no Apêndice A e uma versão ilustrativa é apresentada na Figura 4. O IDM mapeia as trocas de informações e tarefas de cada participante envolvido no processo com a finalidade de desenvolver um projeto integrado dentro de um ambiente BIM, onde modelos e relatórios são compartilhados para análises técnicas.

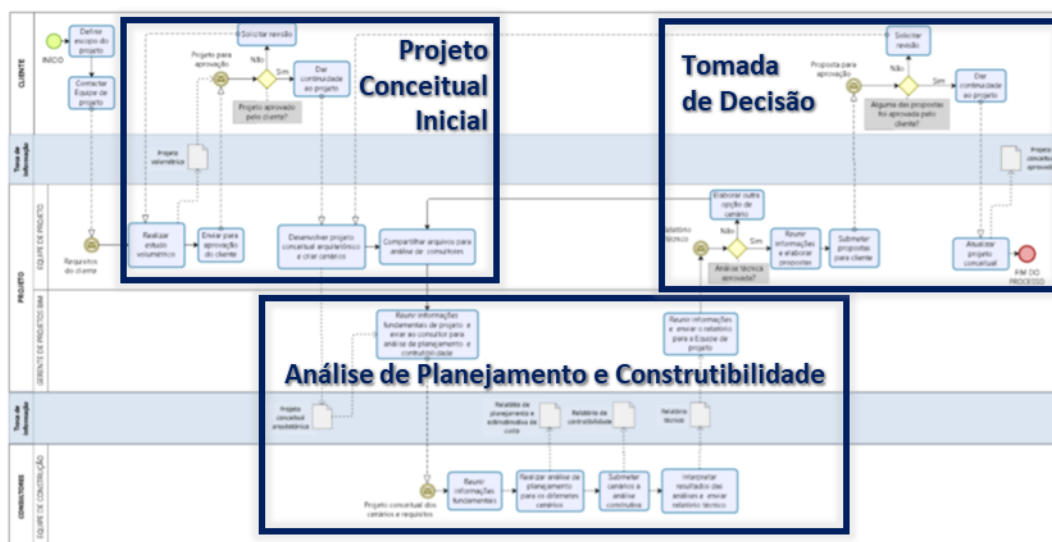


Figura 4 - Versão esquemática do IDM proposto.

O IDM inicia com a solicitação do cliente de um projeto com base nas premissas, sua atividade fim, requisitos técnicos e o orçamento disponível. Neste momento é definido que o requisito do cliente é desenvolver um projeto de edificações replicáveis em escala utilizando concreto armado. Nesse sentido, o projeto requer uma análise técnica de especialistas que avaliem o planejamento, a viabilidade econômica e construtiva das diferentes soluções estruturais apresentadas pela equipe de projeto.

O processo inicia com a solicitação à equipe de projeto de um empreendimento com base em requisitos previamente definidos. Em seguida, a equipe de projeto realiza o estudo volumétrico que deverá ser avaliado pelo cliente, sendo assim, o cliente pode solicitar modificações no projeto. A continuidade do desenvolvimento do projeto depende da aprovação do cliente nesta etapa.

Com a aprovação da volumetria do empreendimento, a equipe de projeto desenvolve o projeto conceitual arquitetônico com o lançamento inicial da estrutura. A partir deste momento, a equipe de projetos deve avaliar a utilização do conceito de projeto para montagem e fabricação e a utilização de peças pré-fabricados para elaborar os cenários das diferentes soluções estruturais. As opções de projeto desenvolvidas podem ser compostas por elementos estruturais de concreto moldado in loco ou por elementos estruturais de concreto pré-fabricado.

Pressupõe-se neste momento que a equipe de projeto tenha definido o projeto conceitual com todos os elementos estruturais e arquitetônicos necessários, definição da geometria do edifício com estimativa de volume, área, posição e

dimensão dos elementos. No final desta tarefa, os requisitos representam algumas das informações de entrada para realizar as análises de planejamento, estimativas de custo e construtibilidade e são geradas as diferentes opções de projeto conceitual com enfoque na estrutura.

Uma vez finalizada esta tarefa, a equipe de projeto compartilha os modelos dos diferentes cenários com o gerente de projetos BIM. Assim que este recebe esses relatórios e reúne as informações fundamentais que serão enviadas para a equipe de construção avaliar as opções de projeto quanto ao planejamento, estimativa de custo e facilidade de construção.

A partir do recebimento do relatório e informação, a equipe de construção realiza um estudo de planejamento dos cenários propostos. Essa equipe é responsável por avaliar inicialmente a produtividade das atividades a serem realizadas no canteiro de obra e fornecer estimativas básicas de custo das diferentes opções de projeto. Para dar início a essa tarefa, faz-se um relatório do projeto conceitual arquitetônico que contenha informações estimadas de área de seções transversais e volume dos elementos estruturais e armadura para realizar a escolha adequada das composições de custo.

Posteriormente, a equipe de construção realiza a análise construtiva. Para desenvolver essa análise é necessário ter o relatório completo do projeto conceitual. Nesse segundo momento essa equipe é encarregada de realizar uma avaliação acerca da construtibilidade dos diferentes cenários propostos, bem como por gerar um relatório técnico que será enviado ao gerente de projetos BIM.

Ao receber o relatório técnico, o gerente de projetos BIM o envia à equipe de projeto. A equipe de projeto avalia o relatório desenvolvido pela equipe de construção e se considerar necessário desenvolve novas possibilidades de cenários, que novamente são avaliadas pela equipe de construção. Quando o relatório é aprovado a equipe de projetos desenvolve, então, propostas com base no custo de implementação, cronograma e construtibilidade das várias propostas. O cliente, então, avalia as propostas de soluções estruturais e seleciona a que mais se adequa às suas necessidades. Caso nenhuma das opções de projeto estrutural apresentadas atendam as demandas do cliente, este pode solicitar revisões até que algum cenário seja aprovado. Após a aprovação do cliente a equipe de projeto pode atualizar o projeto conceitual, concluindo o mapa de processo proposto. O desenvolvimento

do projeto detalhado é a próxima fase do processo. No entanto, essa etapa está além do escopo desta pesquisa e por consequência não é contemplado no IDM.

4.2.Experimento

Esta seção apresenta um experimento fundamentado a partir de um estudo de caso. O experimento se baseia em simulações de diferentes cenários de soluções estruturais para o caso real considerado. Tais simulações foram realizadas de acordo com o IDM proposto na seção 4.1 com o intuito de analisar os resultados de planejamento e construtibilidade.

4.2.1.Objetivo e contexto

O experimento tem como objetivo identificar oportunidades de melhorias no desempenho construtivo em projetos que possuam edificações replicáveis em escala com a introdução de elementos pré-fabricados e princípios de fabricação e montagem. Dessa forma, como visto no IDM apresentado, foram consideradas durante a fase inicial de projeto análises construtivas, de planejamento e de custo de implementação.

Para alcançar tal objetivo, o experimento abordado nessa pesquisa se baseia no projeto das Fábricas de Escolas desenvolvido pela Prefeitura do Rio de Janeiro. Os complexos de escolas foram construídos em bairros da zona norte e oeste da cidade como Maré, Madureira, Pavuna e Manguinhos. O programa Fábricas de Escolas teve como finalidade atingir a meta de ter 35% dos alunos da rede pública estudando em tempo integral até o ano de 2016.

O empreendimento contava com a construção de 136 novas unidades sendo 70 escolas e 66 espaços de desenvolvimento infantil (EDI), que reúnem em um mesmo ambiente creche e pré-escola. A equipe de arquitetura elaborou 16 tipologias de escolas para 4 vãos típicos afim. Os projetos arquitetônicos se diferenciam pela distribuição dos ambientes, quantidade de pavimentos e total de salas, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Tipologia das escolas.

Tipologia		Nº De Pavimentos	Qtd. Sala
ESCOLAS	Modelo 1	2	12
	Modelo 2	3	24
	Modelo 3	2	12
	Modelo 4	3	24
	Modelo 5	3	24
	Modelo 6	3	12
	Modelo 7	3	12
	Modelo 8	2	12
EDI	Modelo 1	2	12
	Modelo 2	2	12
	Modelo 3	3	12
	Modelo 4	3	12
	Modelo 5	3	12
	Modelo 6	3	12
	Modelo 7	3	12
	Modelo 8	3	12

Durante a elaboração do projeto das escolas foram aplicados preceitos construtivos de modularidade, construção enxuta, pré-fabricação, sustentabilidade, segurança e ergonomia.

O projeto estrutural original das unidades de escolas previa a utilização de sistemas construtivos mais ágeis compostos por elementos pré-fabricados. Para isso, as vigas, pilares e lajes tiveram suas dimensões padronizadas de acordo com os 4 vãos típicos e quantidade de pavimentos. As peças foram fabricadas em 8 fábricas localizadas em pontos estratégicos entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais para facilitar a logística de transporte e estocagem de materiais para construção das escolas.

Uma vez que o projeto foi desenvolvido de forma convencional e fora da metodologia BIM, as abordagens de planejamento, estimativa de custo e considerações sobre a facilidade de montagem e construção não foram introduzidas durante a fase inicial de projeto.

Assim, como forma de avaliar a metodologia desenvolvida nesse trabalho, foi realizada uma simulação computacional do projeto Fábrica de Escolas levando em consideração análises de planejamento e construtibilidade. Para a elaboração das simulações das análises no estágio de concepção do projeto foram utilizadas as plantas arquitetônicas e estruturais desenvolvidas ao longo do projeto original.

As plantas disponibilizadas foram analisadas e foram extraídas informações a respeito da geometria do empreendimento, dimensão dos vãos estruturais, disposição dos componentes estruturais e arquitetônicos e localidade da obra. Essas informações serviram como dados de entrada para a elaboração dos modelos 3D parametrizados fundamentados no projeto original das escolas utilizadas nas simulações.

Esse estudo de caso é utilizado para auxiliar na compreensão do IDM proposto. Assim, com o estudo de planejamento construtivo durante o desenvolvimento do projeto conceitual, é possível avaliar a consideração de princípios de fabricação e montagem de elementos estruturais, bem como avaliar as oportunidades de inclusão de elementos pré-fabricados a fim de ajudar o cliente na tomada de decisão das alternativas de projeto, considerando questões econômicas, construtivas e relacionadas ao tempo de construção.

4.2.1.1. Modelo e opções de cenário

Nesta subseção, aborda-se a simulação da fase de elaboração do projeto conceitual inicial do mapa de processo da seção 4.1, conforme ilustrado na Figura 5.

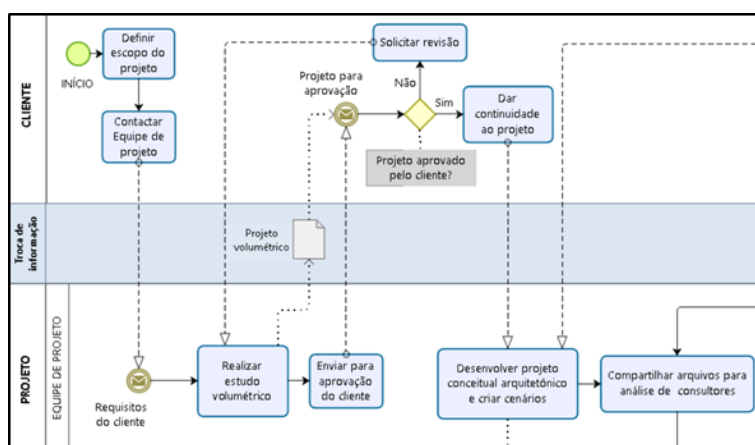


Figura 5 - Fase do IDM: Projeto conceitual inicial.

Para o experimento proposto foi adotado uma tipologia de escola específica e foi desenvolvido um modelo 3D parametrizado da arquitetura e da estrutura no *software* Autodesk Revit 2019. O modelo escolhido é uma representação do projeto original da Fábrica de Escolas, conforme ilustrado na Figura 6. A tipologia é

composta por 2 andares, possui área de 1.040 m² por pavimento, pé-direito de 2,65m e contém 12 salas.

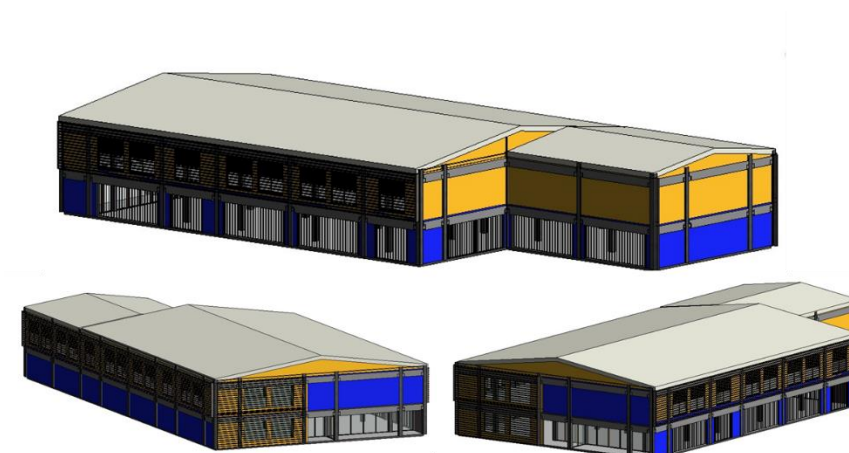


Figura 6 - Escola modelada no *software* Autodesk Revit, fachadas em perspectiva.

O modelo acima, apresentado na Figura 6, serviu como base para elaboração da proposta volumétrica pela equipe de projeto. A tipologia 8 da Tabela 5 é utilizada como sugestão volumétrica inicial nesse estudo. A adoção desta tipologia caracteriza a etapa inicial do projeto conceitual no IDM.

No experimento realizado, duas propostas de projeto conceitual foram elaboradas pela equipe de projeto em que ambas levam em consideração apenas os elementos estruturais. Esta etapa no IDM reproduz o momento em que a equipe de projeto recebe aprovação do estudo volumétrico pelo cliente. Mediante a esta aprovação, a equipe deve dar continuidade ao desenvolvimento do projeto conceitual e criar os cenários.

As opções de projeto desenvolvidos neste estudo se diferenciam em relação ao local de moldagem de vigas, pilares e lajes. Os dois cenários considerados são representados na Figura 7.

No cenário 01, a supra estrutura é composta por elementos estruturais de concreto armado moldado in loco.

No cenário 02, toda a supra estrutura é composta por peças de concreto armado pré-fabricado.



Figura 7 - Ilustração das diferenças entre os cenários analisados.

As alternativas de cenários foram modeladas no *software* Autodesk Revit versão 2019, usando LOD 200, conforme sugerido por (VARGAS; FORMOSO, 2020). Nesse LOD (*Level of Development*), os elementos presentes no modelo são genéricos e contém apenas informações de geometria, quantidades, forma, localização e orientação aproximada (AIA; ACG, 2019). Ademais, foram extraídos dos modelos os quantitativos de volume e área dos elementos estruturais que serviram como dados de entrada para realização das análises de planejamento e construtibilidade.

Após a elaboração dos cenários, o processo continua com a equipe de projeto preparando os relatórios e as informações fundamentais a serem enviados ao gerente de projetos BIM.

4.2.2. Análise de planejamento e construtibilidade

Para atingir os objetivos desta pesquisa, foram realizadas análises relacionadas ao cronograma de obra, estimativa de custo e construtibilidade para as duas opções de cenário.

No IDM proposto a fase que será descrita nessa subseção está apresentada na Figura 8. Para realização deste estágio é necessário que o gerente de projetos BIM compartilhe a equipe de construção os relatórios do projeto conceitual inicial e arquivos fundamentais de cada alternativa de cenário, que servirão como dados de entrada para as avaliações econômicas, de tempo e construtivas.

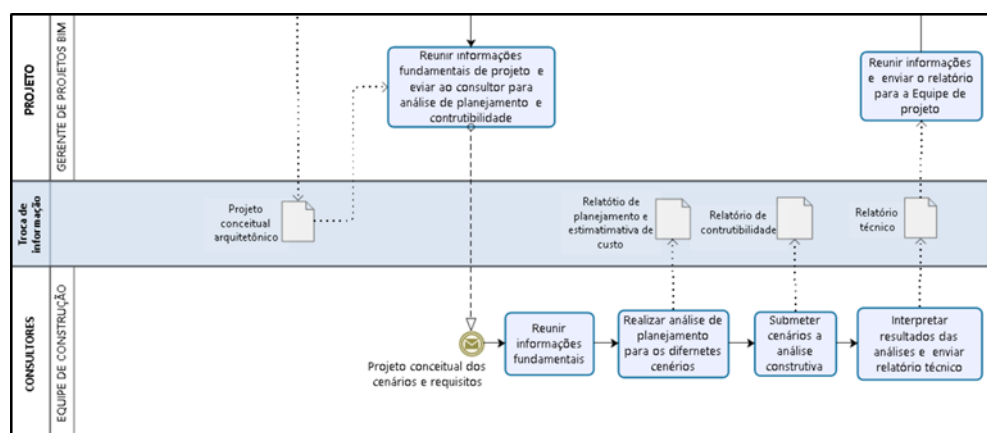


Figura 8 - Fase do IDM: Análise de planejamento e construtibilidade.

4.2.2.1. Atribuições para o planejamento preliminar

O primeiro passo para realizar as análises é desenvolver uma Estrutura Analítica do Projeto (EAP) após obtenção das opções de projeto modelados. A elaboração de uma EAP se faz necessária uma vez que nela as entregas e trabalhos do projeto são subdivididos em componentes menores e mais facilmente gerenciáveis (PMI, 2013).

Com base no trabalho realizado por SENGHER (2018), foi definido o pavimento como uma atividade de entrega da EAP, chamada de atividade “mãe”. Os serviços atrelados a essa atividade foram definidos como componentes menores, denominados de atividades “filhas”. A Tabela 7 ilustra a EAP elaborada para os cenários 01 e 02.

Tabela 7 - EAP para o projeto de estruturas moldadas in loco e pré-fabricada.

Atividade	Estrutura Moldada in Loco	Estrutura Pré-fabricada
"Mãe"	Pavimento	Pavimento
"Filha"	Fabricação, Montagem/Desmontagem de Fôrma	Fabricação e transporte das Peças
	Fabricação e Montagem de Armadura	Montagem das Peças
	Concretagem	

Em seguida, a equipe de construção deve definir a composição unitária para cada alternativa de projeto. Segundo MATTOS (2010) por meio da composição de

custos, é possível se antecipar às necessidades de insumos e estimar custos diretos de cada serviço dentro de uma obra.

A partir das principais características arquitetônicas, estruturais e decisões relativas à caracterização do processo é possível definir as composições dos manuais de orçamento que mais se adequam aos cenários estudados (CBIC, 2017).

Na Tabela 8 é apresentado um quadro com a área construída e descrição simplificada do empreendimento.

Tabela 8 - Quadro com as informações do empreendimento.

Descrição	Média das seções dos pilares	Média das áreas das lajes	Quantidade de Pavimentos	Área por Pavimento	Área Total Construída
Escola	0,16 m ²	29,74 m ²	2	1040 m ²	2080 m ²

A definição das composições unitárias é considerada a etapa mais dispendiosa em termos de tempo devido à necessidade de atribuir todos os insumos que contribuem diretamente na execução de uma unidade de serviço. Ela é também a mais propícia a erros humanos pois a atribuição é realizada de forma manual e depende da experiência de seus colaboradores. Nessa etapa foi utilizado o *software* Sisplo para extrair as composições unitárias presentes nas bases orçamentárias.

O banco de dados utilizado como referência para escolha das composições de custo foi o Sistema Nacional de Pesquisa de Custo e Índices de Construção Civil (SINAPI) do estado do Rio de Janeiro. Tal banco de dados foi escolhido uma vez que o projeto está localizado no referido estado e por ser uma base orçamentária Federal (CBIC, 2017)

Esta base orçamentária é disponibilizada pela Caixa Econômica Federal. Seus relatórios abrangem insumos (materiais, mão de obra e equipamentos) e composições que representam os serviços mais frequentes na construção civil de acordo com a Lei 13.303/2016.

Na Tabela 9 é apresentada a composição de montagem e desmontagem de fôrmas adotada para o cenário 01. Todas as outras composições atribuídas são apresentadas no Apêndice B. A composição unitária é composta por uma atividade macro, em negrito, e por serviços, equipamentos, materiais e mão de obra atrelados a essa atividade com seus respectivos quantitativos, coeficientes e preços.

Tabela 9 - Exemplo da atribuição da composição unitária SINAPI para montagem e desmontagem de fôrmas.

Serviço	Descrição	Unidade
C92414	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE PILARES RETANGULARES E ESTRUTURAS SIMILARES COM ÁREA MÉDIA DAS SEÇÕES MENOR OU IGUAL A 0,25 M², PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_12/2015	M²
C92263	FABRICAÇÃO DE FÔRMA PARA PILARES E ESTRUTURAS SIMILARES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, E = 17 MM. AF_12/2015	M²
C88262	AJUDANTE DE CARPINTEIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H
C88262	CARPINTEIRO DE FÔRMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H
2692	DESMOLDANTE PROTETOR PARA FÔRMAS DE MADEIRA, DE BASE OLEOSA EMULSIONADA EM AGUA	L
40271	LOCACAO DE APRUMADOR METALICO DE PILAR, COM ALTURA E ANGULO REGULAVEIS, EXTENSAO DE *1,50* A *2,80* M	MÊS
40287	LOCACAO DE BARRA DE ANCORAGEM DE 0,80 A 1,20 M DE EXTENSAO, COM ROSCA DE 5/8", INCLUINDO PORCA E FLANGE	MÊS
40275	LOCACAO DE VIGA SANDUICHE METALICA VAZADA PARA TRAVAMENTO DE PILARES, ALTURA DE *8* CM, LARGURA DE *6* CM E EXTENSAO DE 2 M	MÊS
40304	PREGO DE ACO POLIDO COM CABECA DUPLA 17 X 27 (2 1/2 X 11)	KG

Embora a base de dados SINAPI seja muito difundida e completa, não foi encontrada uma composição unitária que fosse adequada para o cenário 02 deste estudo nessa base orçamentária. Contudo, os Art. 6º e 8º do Decreto 7983/2013 preveem a utilização de outras fontes de dados no caso de alguma inviabilidade no uso das referências disponíveis no SINAPI.

Desta forma, foi adotada uma composição de custo proveniente da base orçamentaria EMOP-RJ (Empresas de obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro) para a opção de projeto 02. Desta composição foram extraídos os indicadores de produtividade para cada insumo e serviço utilizado.

No entanto, os preços dos insumos foram extraídos da base orçamentaria SINAPI, pois nela são considerados os custos com encargos complementares, tais como curso de capacitação, alimentação e transporte. A Tabela 10 ilustra a composição adotada para a possibilidade de projeto 02, as demais tabelas

encontram-se no Apêndice B. Essa composição consiste na união dos indicadores de produtividade extraídos da base de dados EMOP-RJ e os preços de insumo e composições de serviço referenciados pelo SINAPI.

Tabela 10 - Exemplo da atribuição da composição unitária EMOP-RJ para montagem de estruturas pré-fabricadas

Serviço	Descrição	Unidade
C11.060.0415-0	ESTRUTURA PRE-FABRICADA EM CONCRETO ARMADO/PROTENDIDO, COM FCK>=30MPA, PARA OBRAS PREDIAIS ATÉ QUATRO PAVIMENTOS, COM PILARES, VIGAS PRINCIPAIS E SECUNDARIAS, LAJES, CONSIDERANDO A MONTAGEM, EXCLUSIVE A CONFECCAO DAS PECAS	M²
37748	CAMINHAO TOCO, PBT 14.300 KG, CARGA UTIL MAX. 9.710 KG, DIST. ENTRE EIXOS 3,56 M, POTENCIA 185 CV, INCLUSIVE CARROCERIA FIXA ABERTA DE MADEIRA P/ TRANSPORTE GERAL DE CARGA SECA, DIMEN. APROX. 2,50 X 6,50 X 0,50 M - MATERIAIS NA OPERACAO. AF_06/2014	H
24952	GUINDASTE HIDRAULICO AUTOPROPELIDO, COM LANCA TELESCOPICA 28,80 M, CAPACIDADE MAXIMA 30 T, POTENCIA 97 KW, TRACAO 4 X 4 - MATERIAIS NA OPERACAO. AF_11/2014	H
10712	GUINDAUTO HIDRAULICO, CAPACIDADE MAXIMA DE CARGA 3300 KG, MOMENTO MAXIMO DE CARGA 5,8 TM, ALCANCE MAXIMO HORIZONTAL 7,60 M, INCLUSIVE CAMINHAO TOCO PBT 16.000 KG, POTENCIA DE 189 CV - MATERIAIS NA OPERACAO. AF_03/2016	H
C88243	AJUDANTE ESPECIALIZADO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H
C88297	OPERADOR DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H
C90779	ENGENHEIRO CIVIL DE OBRA SENIOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H

4.2.2.2. Análise do cronograma

O próximo estágio da análise de planejamento consiste na avaliação do cronograma de obra para os diferentes cenários. Sua determinação tem origem nas durações de cada atividade que integram o projeto (LIMMER, 2008). De acordo com BALLARD; HOWELL (1998) a elaboração do cronograma deve ser realizada nas fases iniciais do projeto, pois há um baixo grau de detalhamento, o que permite identificar datas marco e metas principais do empreendimento.

Por se tratar de um projeto que possui padronização e repetitividade de pavimentos e edificações em uma mesma obra foi adotado o método da linha de

balanço (LoB) no desenvolvimento do cronograma, como indicado nos trabalhos de (LIMMER, 2008; SENGER, 2018; SEPPÄNEN, 2014; VARGAS; FORMOSO, 2020).

A linha de balanço foi desenvolvida para o sistema construtivo convencional e para o sistema estrutural pré-fabricado, levando em consideração os serviços necessários para a conclusão dos pavimentos. Segundo LUCKO; GATTEI (2016) é primordial que o dimensionamento das equipes siga critérios bem definidos e que sejam mantidas as relações de precedência de cada atividade executada no desenvolvimento da LoB.

O primeiro passo para desenvolver o cronograma de LoB foi estimar a quantidade de horas de trabalho necessárias para produção de uma unidade de repetição. Nesta etapa, o pavimento é considerado como uma unidade de repetição como sugerido no trabalho de SENGER (2018).

As composições de custo definidas anteriormente na subseção 4.2.2.1 foram vinculadas às atividades da EAP para que fossem desenvolvidos planos de longo prazo, representados pela linha de balanço.

Para esta análise foram consideradas todas as atividades realizadas no canteiro de obra, tais como, fabricação, montagem e desmontagem de fôrmas, montagem e desmontagem de armadura e concretagem para a opção de cenário que utiliza elementos moldados in loco. No cenário que incorpora peças pré-fabricadas foi considerada apenas a atividade de montagem das peças estruturais.

A partir da consulta das composições de custo provenientes dos manuais de orçamentação foi possível extrair os fatores de produtividade de mão de obra para um determinado serviço. O indicador utilizado para mensurar a produtividade é denominado de razão unitária de produção (RUP), seu cálculo é ilustrado na Equação 2.

$$RUP = \frac{H.h}{QS} \quad (2)$$

Onde, H.h é o total de homens-hora despendido e QS é a quantidade de serviço realizado.

Os indicadores de produtividade de mão de obra oriundos do SINAPI, e da maioria dos manuais de orçamento, são medidas que representam o desempenho da mão de obra na execução das atividades ao longo de todo o período de tempo de sua execução. Estes indicadores incorporam a perda de eficiência decorrente de

imprevistos na execução dos serviços na obra, tais como eventos climáticos, atraso na entrega de suprimentos e quebra de equipamentos. Dessa forma, seu uso é indicado apenas para fins de orçamentação (CBIC, 2017).

Segundo a CBIC (2017), no momento do dimensionamento das equipes de mão de obra é recomendável reduzir o fator de indicadores de produtividade de trabalhadores (RUP), a fim de considerar um planejamento adequado que minimize gargalos e ineficiências previsíveis.

Para o experimento proposto nesse relatório, no momento do dimensionamento da equipe de mão de obra, é adotado um fator que desconsidera os efeitos anômalos e perda de eficiência que usualmente ocorrem durante as atividades. Como indicado pela CBIC (2017), é utilizado um fator referencial de 30%, que representa um valor médio percebido no serviço de execução de estrutura.

Uma vez definido os indicadores de mão de obra desconsiderando as perdas de eficiência é possível calcular a quantidade de H.h necessários de oficiais para execução das atividades por pavimento. O cálculo é realizado através da multiplicação desse indicador pela quantidade de serviço.

O segundo passo para elaboração da LoB foi determinar o tamanho ideal da equipe e os horários de início e término das atividades em cada unidade de repetição.

De acordo com a CBIC (2017), as características da mão de obra local, prazo total do empreendimento, disponibilidade de materiais e equipamentos são alguns dos fatores que influenciam na velocidade de execução da estrutura. Por isso neste estudo, a determinação do ritmo de andamento da estrutura é estimada em função do número de pavimentos executados por dia.

Para o dimensionamento da equipe ideal foi considerado para esse estudo que cada operário trabalha 8 horas por dia e que o mês tivesse 22 dias (SENGER, 2018). Ademais, como o modelo de nivelamento de recursos apresentado neste trabalho é baseado no “Princípio do Ritmo Natural”, preservou-se em cada atividade o tamanho da equipe de operários para que a duração da produção de uma unidade permanecesse constante para cada serviço (DAMCI et al., 2016)

A linha de balanço foi desenvolvida para as duas alternativas de cenários do experimento proposto.

4.2.2.3. Análise do efeito aprendizagem

O caráter repetitivo do empreendimento analisado faz com que seja avaliado o efeito aprendizagem nesse trabalho durante a análise de planejamento (AGNOLETTTO, 2010). Assim, buscou-se caracterizar o comportamento quanto ao aumento de produtividade pela modelagem por curvas clássicas.

Existem diversos modelos de curvas de aprendizagem, dentre os mais famosos estão o modelo linear, o modelo Stanford B, o modelo cúbico, o modelo exponencial e o modelo segmentado (AGNOLETTTO, 2010). De acordo LEITE et al. (2004), o modelo linear de curva de aprendizagem é o mais adequado para a análise das atividades na construção civil, e por isso é adotado neste estudo. Este modelo recebe este nome, pois forma uma linha reta quando desenhado em uma escala logarítmica.

A Equação 3 ilustra o modelo linear de curva de aprendizagem desenvolvida pela T. P. Wright em 1936.

$$Y_x = AX^{-n} \quad (3)$$

Onde:

- Y_x , é o custo, quantidade de homem-hora ou tempo necessário para x-ésima operação;
- A , é o custo, quantidade de homem-hora ou tempo necessário para primeira operação;
- n , é o parâmetro que caracteriza a curva de aprendizagem.

O parâmetro n está relacionado à porcentagem de redução do tempo médio de execução de uma unidade de repetição. A produtividade ganha devido ao efeito de aprendizagem é denominada de taxa “S” e estabelece a inclinação da curva. Assim, quanto menor é a porcentagem da taxa “S”, maior é o aprendizado.

A fórmula da taxa “S” é apresentada na Equação 4.

$$S = 2^{-n} \quad (4)$$

A literatura aponta que para a execução de estruturas de edifícios deve-se utilizar uma taxa “S” de aproximadamente 95%. Na construção civil tem-se observado curvas entre 80% e 95% (OLIVEIRA et al., 1998b).

Os serviços escolhidos para medições de produtividade foram: execução de fôrmas, montagem de armaduras, concretagem para a estrutura moldada in loco; montagem de peças para os elementos estruturais de concreto pré-fabricado.

Posteriormente a escolha dos serviços, a produtividade dos trabalhadores medida em homens-hora para execução da estrutura de um pavimento de repetição foi prevista a partir dos resultados das planilhas e linha de balanço desenvolvidas nas subseções anteriores desta seção.

Para a coleta da produtividade de mão de obra, adotou-se o método de coleta global sugerido por AGNOLETTTO (2010). Este método consiste na inclusão de todo e qualquer operário que esteja envolvido na execução de um serviço, sem distinção de cargo ou profissão, para determinar a produtividade da mão de obra em homens-hora das atividades.

De acordo com LEITE et al. (2004), para que o efeito aprendizagem seja considerado legítimo o trabalho deve ser realizado de maneira contínua por uma mesma equipe de funcionários e não pode haver alterações no método executivo do serviço analisado. Desta maneira, os métodos executivos e as equipes dimensionadas na subseção 4.2.2.2 foram consideradas os mesmos durante toda a análise do empreendimento estudado, para cada opção de projeto.

Os dados coletados do tempo em homem-hora para realização de um pavimento de repetição foram analisados para cada cenário através de gráficos e planilhas obtidas com o auxílio do *software* Excel 2013.

O efeito aprendizagem acaba influenciando no número de dias totais dispendido na execução de cada pavimento. Por esse motivo, o número total de dias também foi analisado para cada alternativa de projeto por meio das curvas de aprendizagem, como sugerido por LEITE et al. (2004).

4.2.2.4. Análise de viabilidade econômica

De posse das demandas por materiais e mão de obra para execução de cada serviço a equipe de construção pode estimar os custos diretos, multiplicando-se as quantidades físicas pelo preço unitário dos recursos de insumo de materiais ou horas de trabalho, conforme Equações 5 e 6.

$$R\$ \text{ gasto com mão de obra} = \frac{R\$}{H.h} \times H.h \quad (5)$$

$$R\$ \text{ gasto com material} = \frac{R\$}{Q_{mat.}} \times Q_{mat.} \quad (6)$$

Onde, $R\$$ é o valor em reais, $H.h$ é o total de homens-hora despendido em uma atividade, Q_{mat} é a quantidade total de material utilizado.

Tais preços unitários podem ser levantados a qualquer momento, porém neste trabalho é realizado durante a fase de desenvolvimento do projeto conceitual para estimar o custo de cada opção de projeto desenvolvido.

Como referência para este estudo, são adotados valores presentes no sistema SINAPI que fornece preços atualizados para as principais capitais brasileiras (CBIC, 2017). Em concordância com a localidade do experimento utilizam-se documentos referentes ao mês de setembro de 2019 do Rio de Janeiro com auxílio do *software* Sispro.

Vale ressaltar que os valores atribuídos de mão de obra estão inclusos ferramentas de uso pessoal dos funcionários, alimentação, cursos de capacitação e transportes verticais de material (CBIC, 2017).

As composições de preço unitárias utilizadas nessa etapa são apresentadas no Apêndice B.

No fim desta etapa de análise de acordo com o mapa de processo da seção 4.1, é gerado pela equipe de construção um relatório de planejamento e estimativa de custo para os diferentes cenários.

4.2.2.5. Análise Construtiva

Seguindo a sequência das etapas do IDM, a equipe de construção deve realizar o estudo construtivo das opções de projeto apresentadas após a elaboração do relatório de planejamento e estimativa de custo.

Nesta etapa, é desenvolvida uma lista de verificação, ilustrada no Apêndice C, a partir do levantamento de boas práticas construtivas identificadas na literatura e dos princípios construtivos apresentados na subseção 3.3.1.

Como mencionado anteriormente, a análise da lista de verificação na fase de desenvolvimento do projeto conceitual propicia melhorias na construtibilidade do

projeto evitando assim, inconsistências e retrabalhos no canteiro de obra (NARLOCH, 2015).

Os itens da lista de verificação foram agrupados em cinco grupos de critério construtivos: (a) simplificação do projeto; (b) padronização do projeto; (c) produtividade no canteiro de obra; (d) sequência de processos e interdependência entre atividades; e (e) boas práticas da indústria.

A lista de verificação proposta tem como finalidade gerar um índice de construtibilidade para o projeto e processo dos cenários estudados. Para cada item a ser verificado foram disponibilizadas as seguintes opções de resposta: sim, não e não aplicável.

A Equação 7 ilustra a fórmula para calcular o índice de construtibilidade, bem como os critérios para coleta de dados.

$$I_c = \frac{\sum P_o}{(P_p - \sum N_a)} \quad (7)$$

Onde:

- I_c , é o índice de construtibilidade do projeto e processo do empreendimento estudado;
- P_o , é o ponto obtido em cada item da lista de verificação. Sendo atribuído 1 (um) ponto para cada resposta “sim” e 0 (zero) ponto para cada resposta “não”;
- P_p , são os pontos possíveis, ou seja, o número total de itens presentes na lista de verificação;
- N_a , itens que não se aplicam ao caso avaliado.

A fim de corroborar a análise construtiva, propõe-se a utilização de um relatório de pontuação construtiva além da lista de verificação. Este relatório se baseia no Sistema de avaliação construtiva (CAS) desenvolvido pela BCA (*Building and Construction Authority*) e sofreu algumas adequações para se enquadrar à realidade brasileira.

As adaptações efetuadas no relatório estão relacionadas com os diferentes tipos de materiais, o número de utilização de fôrmas durante a obra e práticas de concretagem presentes nas bases orçamentárias brasileiras.

O relatório é utilizado como um meio de medir o impacto da escolha dos métodos e tecnologias de construção na produtividade do canteiro de obra. Dessa

forma, a opção de projeto que obtiver maior pontuação de construtibilidade resultará na escolha de métodos e tecnologias construtivas mais eficientes em termos de mão de obra.

A melhoria da produtividade do setor da construção civil pode ser impulsionada pela inserção de requisitos, como a adoção de um maior grau de padronização na construção de componentes e parâmetros de projeto (BCA, 2017).

De acordo com BCA (2017) a parte estrutural de um projeto de construção é uma etapa crítica de obra que exige um elevado uso de mão de obra. Por isso, as alternativas de sistemas construtivos devem ser avaliadas na fase inicial do projeto visando verificar o potencial de cada sistema em termos de eficiência de mão de obra, o que impactará na produtividade da obra.

O relatório de pontuação construtiva proposto subdivide-se em três categorias descritas abaixo: (a) sistema estrutural; (b) padronização e repetição; e (c) boas práticas da indústria.

A pontuação máxima de construtibilidade para o sistema estrutural é de 60 pontos. O total de pontos alocáveis nessa categoria levam em consideração sistema de acesso externo, sistema de fôrmas e práticas estruturais inovadoras.

Assim, para um sistema de fôrmas específico a pontuação construtiva é fornecida por meio do produto da porcentagem da área que utiliza o sistema de fôrma e sua pontuação atribuída correspondente.

Para os componentes de padronização e repetição o máximo de pontos que pode ser obtido é 6. Esta categoria envolve critérios de padronização estrutural e repetição do pé-direito.

Na categoria boas práticas da indústria os pontos são concedidos para cada prática adotada que ajude a melhorar a produtividade da construção, até um máximo de 9 pontos.

As Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 exibem as diferentes categorias presentes no relatório de pontuação construtiva.

Tabela 11 - Categoria Sistema estrutural (Adaptado de CAS, 2017).

SISTEMA ESTRUTURAL (máximo 60 pontos)		
Tecnologias/Métodos Construtivos	Pontuação	Método de Cálculo
Sistema de Fôrma Vertical (máximo 15 pontos)		
Fôrma tradicional madeira ou metal	1	$\frac{\Sigma(\text{Área de contato de forma vertical} \times \text{pontos alocados})}{\text{Total de Área de contato de fôrma vertical}}$
Sem fôrma (sistema pré-fabricado)	15	
Fôrma reutilizável		
até 4 utilizações	8	
até 8 utilizações	11	
até 12 utilizações	13	
até 18 utilizações	15	
Sistema de Fôrma Horizontal (máximo 15 pontos)		
Fôrma tradicional madeira ou metal	1	$\frac{\Sigma(\text{Área de piso} \times \text{pontos alocados})}{\text{Total de área de piso}}$
Sem fôrma (sistema pré-fabricado)	15	
Fôrma reutilizável		
até 4 utilizações	8	
até 8 utilizações	11	
até 12 utilizações	13	
até 18 utilizações	15	
Sistema de acesso externo (máximo 15 pontos)		
Com andaime tradicional externo	1	$\frac{\Sigma(\text{Comprimento do sistema externo} \times \text{pontos alocados})}{\text{Perímetro total do edifício}}$
Sem andaime externo	15	
Sistema estrutural inovador (máximo 15 pontos)		
Uso de concreto auto adensável	2	Pontuação atribuída se o uso for >= 5% do volume total de concreto da supra estrutura
Uso de grua ou bombeamento para concretagem	2	Pontuação atribuída se uma vez utilizado
Uso de guindaste (carga da ponta ≥ 10 toneladas ao alcance máximo)	5	Pontuação atribuída se uma vez utilizado
Uso de sistemas estruturais industrializados (pré-fabricado, pré-moldado, estrutura de aço)	6	Pontuação atribuída se o uso for >= 70% da área total da edificação

Tabela 12 - Categoria Padronização e repetição (Adaptado de CAS, 2017).

PADRONIZAÇÃO E REPETIÇÃO (máximo 6 pontos)			
Descrição	Unidade a ser analisada	Porcentagem a ser analisada	
		>=70% até <90%	>=90%
Pilares possuem tamanhos padronizados	Número	1,5	2
Vigas possuem tamanhos padronizados	Número	1,5	2
Repetição da altura do chão ao chão (para edificações de mais de 6 andares)	Metros	1,5	2
Repetição da altura do chão ao chão (para edificações de até 6 andares)	Metros	0,75	1

Tabela 13 - Categorias Boas práticas da indústria (Adaptado de CAS, 2017).

BOAS PRÁTICAS DA INDÚSTRIA (máximo 9 pontos)	
Descrição	Pontuação
(a) Adotou o projeto e a construção virtual (VDC) para integrar a modelagem de informações da construção (BIM) e os métodos avançados de gerenciamento para melhorar a produtividade no canteiro de obra	
(i) Verificou se há conflitos entre serviços, estrutura e objetos de arquitetura (ii) Produziu desenhos de coordenação (iii) Simulou cronogramas de construção e planejamento de recursos	2
(iv) Implementou várias tecnologias / práticas de VDC para melhorar a produtividade no canteiro (v) Utilizou engenharia integrada, gerenciamento de processos, produção e métricas como parte do processo de construção	3
(b) Adotou um sistema de monitoramento de produtividade durante a elaboração do projeto conceitual: (i) Estabeleceu "normas de produtividade dos trabalhadores" (ii) Realizou estudos de produtividade dos trabalhadores durante os processos de acordo com fatores de produtividade (iii) Implementou medidas para melhorar a produtividade sempre que possível	2
(c) Desenvolveu maquetes do canteiro de obra que exemplificassem como os trabalhos deveriam ser realizados	2
(d) Realizou estudo de trabalho, para examinar e melhorar o processo de trabalho no canteiro, além de minimizar o desperdício e melhorar a produtividade	1
(e) Pensou-se na utilização de ferramentas para realizar o monitoramento em tempo real no canteiro para estudar o fluxo de recursos, cronograma e o fluxo do processo de trabalho	1

O relatório de pontuação construtiva visa obter melhorias produtivas no âmbito estrutural, de padronização e repetição e de boas práticas da indústria. A pontuação é atribuída com base nos diferentes tipos de métodos, sistemas tecnológicos e processos no âmbito da construção. No final, os pontos são somados para obter o índice de pontuação construtiva (I_p).

Neste trabalho, não são aplicados pesos para os indicadores, mas é sugerida a utilização de um índice de construtibilidade global (I_g) que fornece uma visão global de cada cenário. O índice é calculado por meio da média dos indicadores apresentados como mostra a Equação 8.

$$I_g = \frac{(I_c + I_p)}{2} \quad (8)$$

Dessa forma, a equipe de construção deve responder a lista de verificação e realizar o relatório de pontuação construtiva para cada cenário, a partir dos projetos conceituais e arquivos fundamentais enviados pelo gerente de projetos BIM. Mediante aos resultados obtidos é realizada a média dos indicadores para obter o índice de construtibilidade global (I_g). Ao final da análise construtiva a equipe de construção elabora um relatório técnico que é enviado ao gerente de projetos BIM. Este, que por sua vez, verifica a consistência das informações e o encaminha para avaliação pela equipe de projeto.

5 Resultados e análises

O estudo proposto faz uma análise de planejamento e construtibilidade de um complexo de escolas, sendo estas análises realizadas durante a fase de desenvolvimento do projeto conceitual. Todas as etapas foram baseadas no IDM sugerido na seção 4.1. Este capítulo fornece os resultados e avalia o potencial de cada opção de projeto simulada.

5.1. Análise de planejamento

5.1.1. Produtividade dos trabalhadores por atividade

O primeiro resultado a ser analisado nesse estudo é o comparativo entre a produtividade dos trabalhadores nos dois cenários. Neste estágio da análise, o foco é na métrica do total de produtividade em homem-hora por atividade (H.h), por ser uma métrica que expressa a quantidade de horas necessárias para realizar um determinado serviço (CBIC, 2017; SENGGER, 2018).

A Figura 9 mostra a comparação entre as opções de projeto estudadas para a métrica do total de produtividade em homem-hora por atividade. As atividades são separadas nesta etapa em “fabricação, montagem e desmontagem de fôrma”, “fabricação e montagem de armadura”, “concretagem” para o cenário 01 de estruturas de concreto moldadas in loco; e em “fabricação e transporte de peças” e “montagem de peças” para o projeto com estruturas pré-fabricadas (cenário 02).

Inicialmente, é possível identificar a diminuição entre os cenários do total de produtividade em homem-hora por atividade. O cenário 02 é o que apresenta menor consumo de produtividade em homem-hora para montagem de um pavimento de repetição, levando em conta todas as etapas de elaboração da estrutura.

Entre os cenários 01 e 02 o total de homem-hora para a elaboração da estrutura de uma unidade de repetição reduziu em aproximadamente 12%, de 5.663 H.h, na opção de projeto que utiliza elementos estruturais moldados in loco, para 4.996 H.h, no cenário que utiliza peças pré-fabricadas. Esta redução é decorrente

da substituição das vigas e pilares de concreto moldado in loco por peças pré-fabricadas.

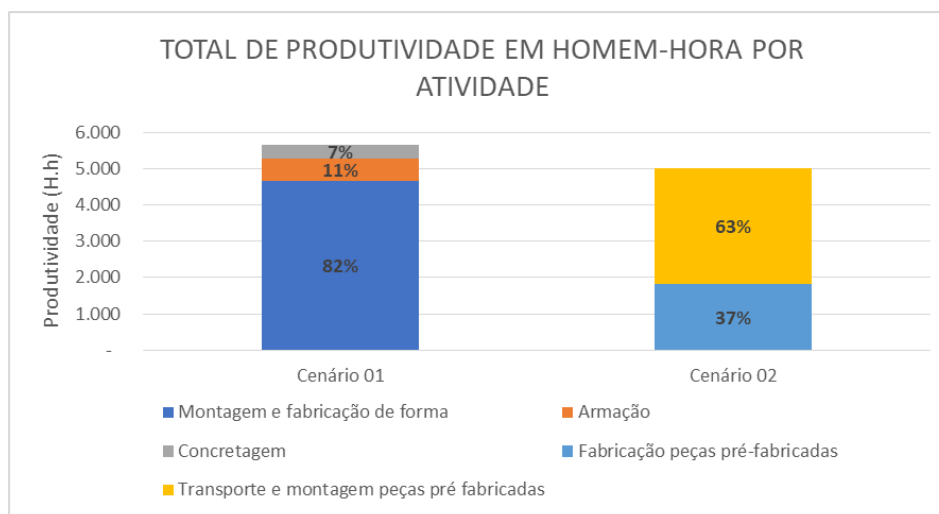


Figura 9 – Comparativo entre os dois cenários do total de produtividade em homem-hora por atividade.

No cenário 01 a métrica do total de produtividade em homem-hora por atividade é igual a 5.663 H.h, 82% deste valor corresponde ao tempo despendido durante o serviço de fabricação, montagem e desmontagem de fôrmas de concreto armado, o que equivale a 4.658 H.h.

A análise realizada demonstra um alto valor de tempo utilizado para realizar os serviços de fabricação, montagem e desmontagem de fôrmas para um pavimento no canteiro de obra. Nesse sentido, para melhorar o desempenho produtivo dos trabalhadores para realizar a execução da estrutura na obra, buscou-se verificar a substituição de vigas, pilares e lajes de concreto armado por peças de concreto pré-fabricadas como alternativa de projeto.

Ademais, pode ser verificado na Figura 9 que a fabricação das peças no cenário 02 corresponde a 37% do total de produtividade em homem-hora por atividade, o que equivale a 1.832 H.h. A redução do total de homem-hora para esse serviço está relacionada ao sistema construtivo pré-fabricado que produz suas peças em fábricas. A introdução de máquinas auxilia os trabalhadores na fabricação da estrutura e melhora a eficiência construtiva no canteiro de obra.

5.1.2.Cronograma preliminar

O próximo resultado analisado neste estudo é o cronograma, representado pela linha de balanço. Como mencionado na subseção 4.2.2.2, para estimar a quantidade de horas necessárias para que uma equipe de tamanho ideal produza uma unidade de repetição, deve-se definir todos os serviços necessários para execução desta unidade.

Dessa forma, admitindo apenas o tempo de trabalho realizado no canteiro de obra a diferença de produtividade em homem-hora para a produção de uma unidade de repetição é de aproximadamente 44% entre os cenários 01 e 02, conforme Figura 10.

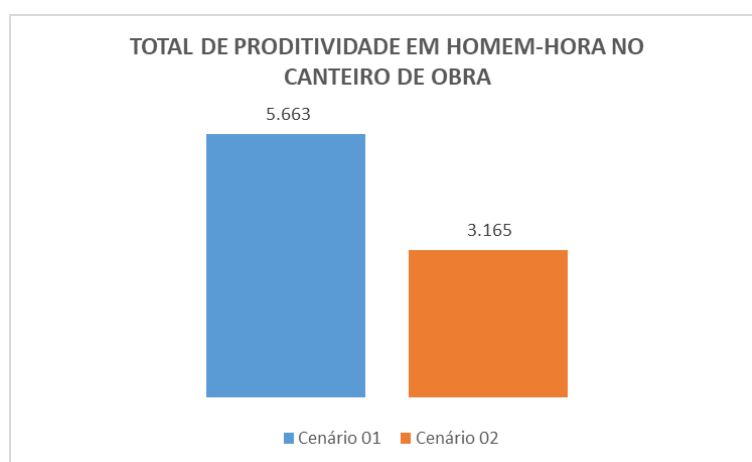


Figura 10 - Comparativo entre os dois cenários do total de produtividade em homem-hora no canteiro de obra.

Na opção de projeto do cenário 02 verifica-se que o total de homem-hora no canteiro diminuiu para 3.165 H.h, devido à utilização de elementos estruturais de concreto elaborados em sistema fabril. A utilização de peças pré-fabricadas potencializa a eficiência dos serviços desenvolvidos pelos trabalhadores por meio da diminuição do número de peças e serviços a serem manuseados e executados no canteiro de obra. Para esta análise o serviço de fabricação das peças na fábrica é desconsiderado para gerar o cronograma preliminar de obra.

Com base na determinação do total de produtividade em homem-hora no canteiro de obra, nas definições das durações e do ritmo de execução das tarefas para cada um dos dois cenários, elabora-se o cronograma dos casos propostos. O comparativo entre as linhas de balanço adotadas como plano de longo prazo para elaboração da estrutura dos cenários 01 e 02 é apresentado na Figura 11.

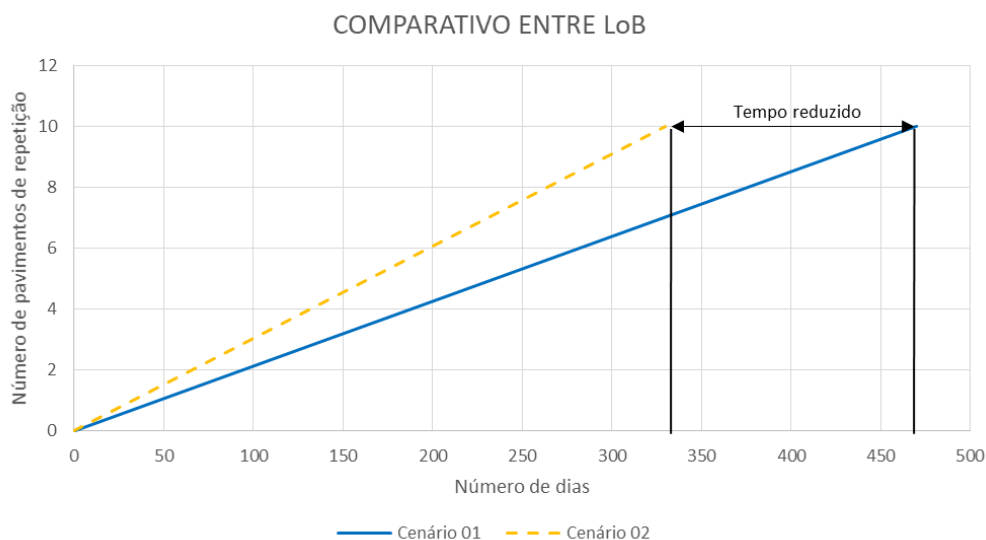


Figura 11 - Comparativo entre as linhas de balanço dos cenários 01 e 02.

O tempo total calculado para realizar a execução da estrutura de um pavimento de repetição com uma equipe ótima é de 33 dias corridos para cenário 02. Portanto, em comparação com o sistema convencional estrutural do cenário 01, que é de 47 dias corridos, há uma redução de 14 dias.

Assim, quando se analisa a construção de 10 pavimentos que correspondem a 5 escolas, uma vez que cada modelo de escola estudada possui 2 andares tipo, a diferença de dias se mantém proporcional. Ou seja, para elaboração de 5 escolas são necessários 470 dias para o cenário 01, e 330 dias para o cenário 02.

A redução de aproximadamente 30% no total de dias corridos de obra deve-se ao fato que em sistemas convencionais de concreto armado a fabricação e montagem de fôrmas e armadura são atividades que requerem uma demanda elevada de dias de trabalho. Entretanto, quando se utiliza sistemas estruturais pré-fabricados de concreto esses serviços são executados em fábricas, economizando boa parte de tempo despendido no canteiro de obra.

5.1.3. Efeito aprendizagem

A próxima etapa da análise de planejamento se concentra no efeito aprendizagem. Os dois cenários são avaliados para quantificar o impacto que a aprendizagem pode ter na produtividade dos trabalhadores quando se realiza a construção de mais de duas edificações semelhantes na mesma obra.

Apresenta-se, na Figura 12, o gráfico de regressões do efeito aprendizagem ocorrido durante a execução dos serviços por pavimento de repetição, para cada possibilidade de projeto.

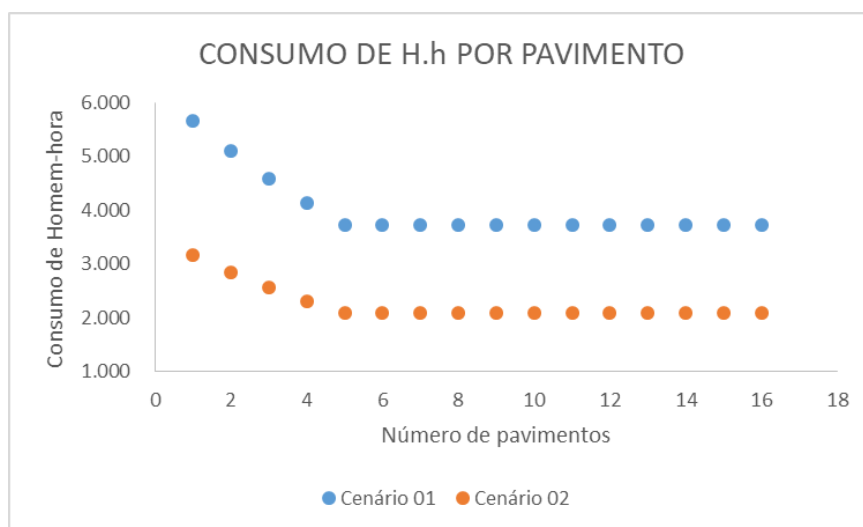


Figura 12 - Regressão do consumo de H.h por pavimento.

Pode-se perceber que o número de homens hora consumido para realizar um pavimento tende a diminuir com o aumento da repetição. Os percentuais de redução da produtividade ao longo do processo, são de: 100% para a primeira execução, 90% para a segunda, 81% para a terceira, 73% para a quarta e 66% para a quinta.

No cenário 01, utilizando a métrica da curva de aprendizagem, o total de homens-hora necessário para execução de uma unidade de repetição é igual a 5.663 H.h. Este valor é reduzido para 3.738 H.h após a quinta repetição, e se mantém constante até a décima sexta (16ª) repetição.

Para o cenário 02 a curva de aprendizagem produz o mesmo efeito. O tempo total de homem-hora necessário para executar um pavimento reduz aproximadamente 36%, de 4.206 H.h, na confecção da primeira unidade de repetição, para 2.776 H.h na elaboração do quinto (5º) pavimento mantendo-se invariável até a décima sexta repetição (16ª).

O efeito aprendizagem apresentado acima faz com que a quantidade de dias que uma equipe de tamanho ótimo leva para elaboração de um pavimento seja reduzido na mesma proporção, conforme Figura 13.

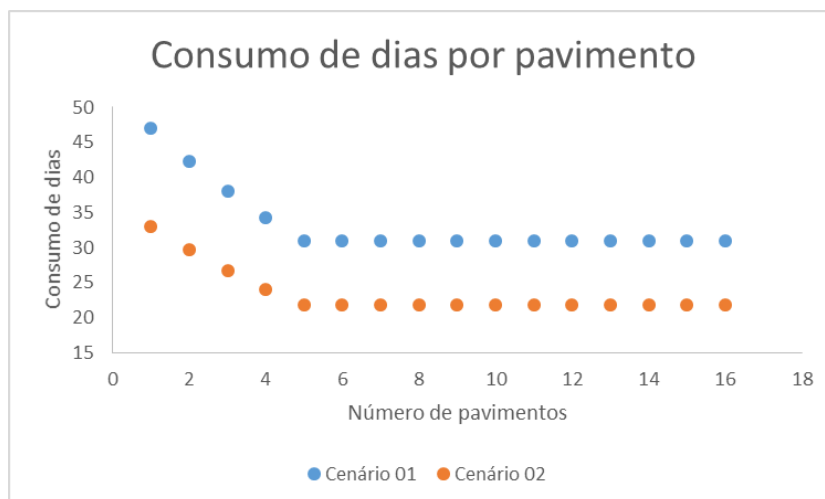


Figura 13 - Regressão de dias por pavimento.

No primeiro cenário a elaboração de um pavimento que levava em média 47 dias teve seu tempo em número de dias reduzido para 31 após cinco repetições. Para a segunda possibilidade de projeto o tempo foi de 33 dias na primeira unidade de repetição para 22.

Com essa análise é possível constatar que a partir de 6 pavimentos replicados identicamente, ou seja, três escolas do experimento em estudo, a produtividade dos trabalhadores é potencializada no canteiro de obra.

5.1.4. Viabilidade econômica

A última etapa da análise de planejamento se concentra na análise econômica. Os preços unitários dos recursos foram extraídos da planilha orçamentária SINAPI como mencionado durante a subseção 4.2.2.4.

De posse da quantidade de material e do tempo em H.h necessário para a execução de cada serviço da estrutura, pode-se calcular os custos diretos para cada cenário estudado.

A análise apresentada na Figura 14 representa o comparativo entre o custo direto para elaboração da estrutura de uma unidade de escola, ou seja, dois pavimentos do referido estudo.

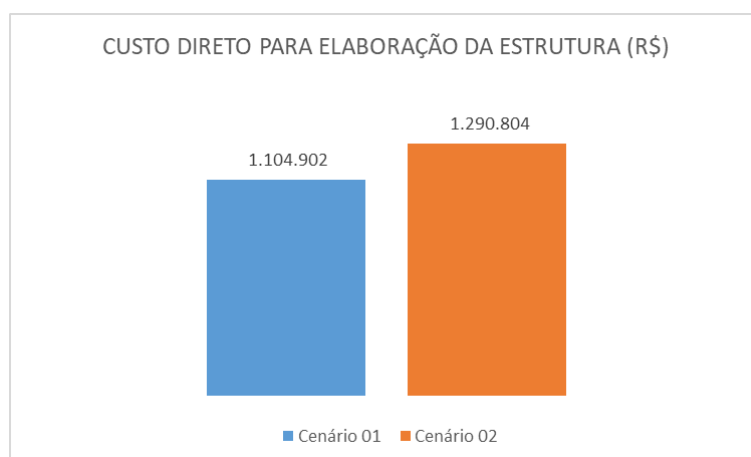


Figura 14 - Comparativo do resultado do custo direto entre os cenários.

O valor passou de R\$ 1.104.902, no cenário 01, para R\$ 1.290.804, no cenário 02, quando se alterou o material estrutural para concreto armado pré-fabricado. O acréscimo de 15% no preço pode ser atribuído a despesas referentes a utilização de mão de obra especializada e transportes de peças no sistema pré-fabricado de concreto.

5.2. Análise de construtibilidade

Nesta seção são apresentados os resultados da análise construtiva realizada para as diferentes opções de cenário.

A lista de verificação proposta na subseção 4.2.2.5 que seria respondida pela equipe de construção é simulada. A Tabela 14 apresenta o que seriam as respostas desses atores, bem como o cálculo do índice de construtibilidade.

Tabela 14 - Cálculo do índice de construtibilidade.

ÍNDICE DE CONSTRUTIBILIDADE DO PROJETO E PROCESSO					
Cenário	Total de itens	Sim	Não	Não aplicável	Ic
1	24	15	6	3	71%
2	24	20	3	1	87%

Este índice leva em consideração em seu cálculo fatores construtivos que avaliam a padronização e simplificação do projeto, assim como avaliam o processo de desenvolvimento e construção dentro e fora do canteiro de obra.

Quanto aos resultados obtidos, a opção de projeto que obtém o melhor resultado em termos de construtibilidade considerando o *layout* do projeto e o processo é o cenário 02 com 87%.

A diferença registrada entre os cenários deve-se ao fato que a alternativa de projeto 02 utiliza elementos pré-fabricados. O emprego desse sistema construtivo propicia a redução do número de atividades conduzidas ao ar livre e a maximização do volume de trabalho conduzido fora do canteiro. Além disso, a utilização de peças pré-fabricadas minimiza o tempo de percepção e decisão por parte dos trabalhadores, por meio da redução do número de componentes e partes.

Para o relatório de pontuação construtiva, os valores do indicativo bem como os pontos obtidos para as diferentes categorias são ilustrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Cálculo do índice de pontuação construtiva.

ÍNDICE DE PONTUAÇÃO CONSTRUTIVA				
Cenários	Sistema Estrutural	Padronização e repetição	Boas Práticas da Indústria	Ip
1	35	5	6	46%
2	50	5	6	81%

A partir da observação da tabela acima é possível entender a influência da escolha do método construtivo na avaliação da construtibilidade para cada possibilidade de projeto. Nota-se que as pontuações alcançadas para as categorias de padronização, repetição e boas práticas da indústria foram as mesmas para ambos os cenários.

A explicação para este fato está relacionada a utilização de plantas estruturais padronizadas equivalentes e que possuem o mesmo pé-direito e número de pavimentos. Ademais, para essa análise são empregadas as mesmas técnicas de projeto, tais como utilização da metodologia BIM e práticas que melhorem a produtividade no canteiro de obra.

Assim, por meio dos modelos paramétricos desenvolvidos em *softwares* BIM a equipe de construção é capaz de extrair informações de projeto adequadas de quantitativo, dimensão e orientação dos elementos do modelo. Essas informações servem como dados de entrada para que os critérios de construtibilidade sejam avaliados. A disponibilidade e confiabilidade dessas informações permite que os atores envolvidos no projeto avaliem a construtibilidade durante a fase de projeto conceitual e desenvolvam se necessárias novas soluções de projeto que potencializem a fabricação e montagem no canteiro de obra. Como os dois cenários

analisados utilizaram a metodologia BIM durante o desenvolvimento do projeto, receberam a mesma pontuação relacionada a esse critério.

O cenário 02, com 81%, obteve o maior índice de pontuação construtiva, cerca de 35% de diferença no indicativo construtivo em comparação com o outro cenário. Como pode-se verificar a escolha do tipo de solução estrutural exerce grande impacto na construtibilidade de um edifício.

O emprego de métodos construtivos pré-fabricados reduz o número de partes e de passos no fluxo do processo construtivo. Esta simplificação tem como objetivo reduzir a complexidade do produto melhorando a eficiência do processo e aumentando a qualidade do projeto.

A avaliação final considera todos os indicadores construtivos e suas métricas. Assim, para obter-se o índice de construtibilidade global (I_g) foi feita uma média aritmética entre os dois índices calculados anteriormente. O resultado final é apresentado na Figura 15.

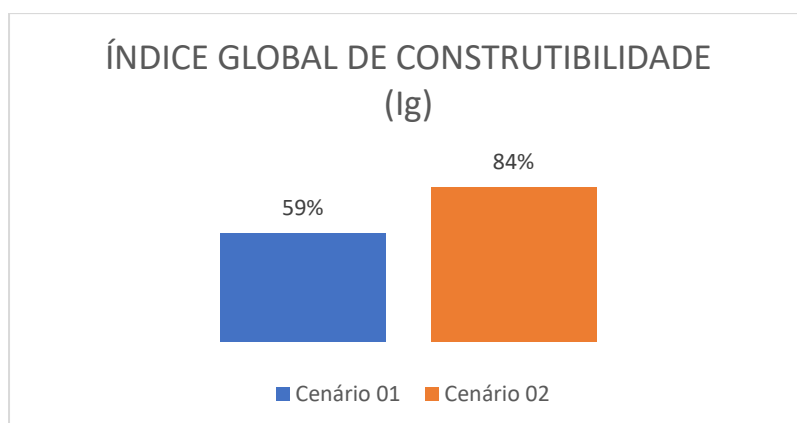


Figura 15 - Comparativo do resultado do índice de construtibilidade global.

Como pode ser constatado, existe uma diferença de aproximadamente 25% entre os valores alcançados por meio do indicador de construção global para os dois cenários analisados. A diferença registrada entre as medidas é decorrente da substituição dos elementos estruturais convencionais de concreto por peças de concreto armado pré-fabricas e dos processos desenvolvidos durante o projeto. Este fato leva à conclusão que as soluções de projeto, bem como a escolha dos métodos construtivos, exercem um impacto considerável na construtibilidade de empreendimentos replicáveis em escala.

5.3.Discussões dos resultados

Os estudos de planejamento e construtibilidade dos cenários mostram que as decisões tomadas pelos responsáveis do projeto impactam na eficiência de montagem no canteiro de obra. A realização de análises de planejamento construtivo, ainda nos estágios iniciais do desenvolvimento de projetos de edificações replicáveis em escala pode beneficiar os interesses econômicos, práticos, estéticos e de prazo do projeto. Além disso, essas análises auxiliariam clientes e arquitetos como mais um parâmetro nas tomadas de decisões, a fim de aprimorar a identificação de oportunidades de melhorias no desempenho construtivo.

No experimento desenvolvido foram identificadas oportunidades de melhorias do desempenho de planejamento e construtibilidade com a implementação do BIM atrelado a técnicas de fabricação e montagem.

A metodologia BIM permite que seja levada em consideração possibilidade de soluções estruturais e conceitos de projetar para fabricação e montagem ainda na fase inicial de projeto através dos modelos paramétricos desenvolvidos. Esses modelos contêm informações adequadas de quantitativo, dimensão e orientação para a fase de projeto analisada e servem como dados de entrada para as avaliações de planejamento e construtibilidade.

A análise de planejamento e construtibilidade desenvolvida no estudo mostra que o cenário com maior índice de construtibilidade, considerando o relatório de pontuação construtiva e a lista de verificação, é o cenário 02, com a estrutura de concreto pré-fabricada.

A utilização de princípios de fabricação e montagem impactam diretamente a análise construtiva dos projetos. A simplificação do *layout* do projeto e a utilização de peças estruturais pré-fabricados permitem a redução do número de passos e processos de montagem no canteiro de obra. O total de produtividade em homem-hora por atividade diminui em aproximadamente 44% devido a maximização do volume de trabalho fora do canteiro de obra.

Em termos de viabilidade econômica, o cenário 01, que possui elementos estruturais de concreto moldados in loco, se mostrou o mais benéfico, com redução de 15% no custo direto. Assim, em projetos que possuam pouco número de repetições a utilização de elementos estruturais pré-fabricados não é indicada

devido ao elevado custo de implementação desse método construtivo referente a despesas de mão de obra especializada e transportes de peças até o canteiro de obra.

No entanto, com a implementação de peças estruturais pré-fabricadas há uma redução de cronograma de 30%. Este ganho em dias de entrega de projeto atrelado ao aumento do número de repetições das edificações pode suprir essa diferença de preço entre os dois cenários. Isso vai depender da bonificação acordada em contrato para entregas em um prazo reduzido e da diminuição dos custos indiretos relacionados a serviços e a trabalhos realizados em atividades de supervisão ou apoio à produção de engenheiros, auxiliares técnicos, arquitetos e almoxarife. Além disso, a padronização dos elementos estruturais e produção em larga escala também podem acentuar essa diferença de custo.

A padronização dos elementos estruturais proporciona o aumento no índice de construtibilidade e possibilita o efeito de aprendizado devido a repetitividade das operações no canteiro. É possível constatar com a análise do efeito de aprendizagem que a partir de 6 pavimentos replicados identicamente, ou seja, três escolas do experimento em estudo, a produtividade dos trabalhadores é potencializada no canteiro de obra.

Dessa forma, pode-se concluir que a inclusão da metodologia BIM atrelada a princípios de fabricação e montagem é importante para o desenvolvimento de projetos de edificações replicáveis em escala, uma vez que a simplificação e padronização do projeto e dos elementos estruturais permitem maior eficiência construtiva.

6 Conclusões

O método de pesquisa aplicado possibilitou as seguintes conclusões.

- A Revisão Sistemática da Literatura (SLR) orientou este estudo e mostrou que há uma crescente adoção da metodologia BIM e um interesse no desenvolvimento de projetos de edificações replicáveis em escala, com a introdução de princípios de fabricação e montagem. Embora não tenham sido encontradas pesquisas que abordem significativamente todos os esses conceitos esta possibilidade é perceptível e até citada em alguns estudos.
- A abordagem BIM forneceu um ambiente no qual o planejamento de construções replicáveis em escala atrelado a conceitos de projeto para fabricação e montagem poderiam ser considerados nos estágios iniciais do projeto. As informações contidas nos modelos paramétricos desenvolvidos em ambiente BIM serviram como dados de entrada para as análises de planejamento e construtibilidade permitindo que fossem contemplados diferentes cenários de soluções estruturais.
- A análise de planejamento e construtibilidade nesse estudo seria incluída como mais um parâmetro que auxiliaria nas tomadas de decisões e aprimoraria a identificação de oportunidades de melhoria no projeto que facilitem a montagem e potencializem a eficiência de trabalho no canteiro de obra.
- A consideração de elementos de concreto pré-fabricado nem sempre vai contra os interesses econômicos, práticos, estéticos e de prazo. As soluções de projeto utilizadas no experimento reduziram o cronograma de obra, estimulariam a produção de

peças em larga escala e facilitariam a montagem da estrutura através da minimização de peças e partes a serem construídas.

- O IDM proposto viabilizaria as trocas de informações entre os atores durante o desenvolvimento do projeto e possibilitaria a redução da necessidade de modificações de projeto e serviços durante a fase de construção, além de dar a oportunidade de as soluções de projeto serem formuladas e analisadas de maneira mais adequada.
- Em termos de cronograma para construir 5 escolas, a utilização de elementos pré-fabricados na estrutura apresentaria uma redução de 30% no total de dias corridos de obra, devido ao fato que em sistemas convencionais de concreto armado a fabricação e montagem de fôrmas e armaduras são atividades que requerem uma demanda elevada de dias de trabalho.
- Em termos econômicos a construção de uma unidade de escola utilizando sistema construtivo pré-fabricado representaria acréscimo de 15% no custo direto, quando comparado com a utilização de sistema convencional. No entanto, a produção das peças estruturais em larga escala, possíveis bonificações acordadas em contrato para entregas antes do prazo estipulado e diminuição dos custos indiretos da obra poderiam suprir essa diferença de preço entre os dois sistemas construtivos.
- Considerando o efeito aprendizagem é possível constatar que a partir de 6 pavimentos replicados identicamente, ou seja, três escolas do experimento em estudo, a produtividade dos trabalhadores seria potencializada no canteiro de obra.
- O efeito aprendizagem correlacionado à produtividade dos trabalhadores geraria uma melhor gestão de planejamento e controle por parte dos projetistas como forma de aumentar a competitividade no mercado, além de promover racionalização e melhorias na qualidade dos processos.

- A análise construtiva permitiria que a equipe de projeto levasse em conta estratégias de padronização, simplificação do *layout* na elaboração de projetos, a fim de minimizar inconsistências e retrabalhos.

Para trabalhos futuros nessa área, sugere-se:

- que sejam avaliados outros serviços, tais como, fechamento de alvenaria, instalação hidráulica e elétrica durante as análises;
- a extensão da aplicação do método proposto à edifícios com tipologias diferentes, como condomínios residenciais;
- a expansão da proposta de IDM para outras estruturas, tais como projetos de estruturas metálicas com aço;
- a inclusão da avaliação ambiental dos materiais empregados na edificação em conjunto com a análise de planejamento e construtibilidade.
- a incorporação de conceitos de arquitetura visando melhorar estética, funcionalidade, conforto ambiental e sustentabilidade.

7 Referências

AGNOLETTI, R. A. **Análise do Efeito Aprendizagem na Execução da Estrutura de um Edifício de Pavimentos-Tipo**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.

AIA, T. A. I.; ACG, T. A. G. C. O. A. **Level of Development (LOD) Specification Part I & Commentary**BIMFORUM. [s.l: s.n.].

AKINADE, O. O. et al. Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 167–176, 2015.

ALFIERI, E. et al. A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study. **Architectural Engineering and Design Management**, p. 1–23, 2020.

AMMAR, M. A.; ABDEL-MAGED, A. F. Modeling of LOB scheduling with learning development effect. **International Journal of Construction Management**, v. 18, n. 6, p. 517–526, 2018.

AREDAH, A. S.; BARAKA, M. A.; ELKHAFIF, M. Project Scheduling Techniques Within a Building Information Modeling (BIM) Environment: A Survey Study. **IEEE Engineering Management Review**, v. 47, n. 2, p. 133–143, 2019.

AZIZ, R. F.; HAFEZ, S. M. Applying lean thinking in construction and performance improvement. **Alexandria Engineering Journal**, v. 52, n. 4, p. 679–695, 2013.

BALLARD, G.; HOWELL, G. Shielding production: Essential Step in Production Control. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 1, p. 11–17, 1998.

BANKS, C. et al. Enhancing high-rise residential construction through design for manufacture and assembly - A UK case study. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Management, Procurement and Law**, v. 171, n. 4, p. 164–174, 2018.

BARBOSA, F. ET AL. **Reinventing construction: A route to higher productivity**. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>>. Acesso em: 18 abr. 2020.

BENJAORAN, V.; TABYANG, W.; SOOKSIL, N. Precedence relationship options for the resource levelling problem using a genetic algorithm. **Construction Management and Economics**, v. 33, n. 9, p. 711–723, 2015.

BIOTTO, C. et al. **Comparing production design activities and location-based planning tools**. IGLC 2017 - Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 2017

BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly**. New York: [s.n.], 2004.

BRASIL. **Lei n. 13.303**, de 30 de junho de 2016. Regulamentação das licitações e contratações das Estatais. Lex: Publicação Original, Diário Oficial da União de 01/07/2016, p. 1, col. 2.

BRASIL. **Decreto n. 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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Decreto/D7983.htm>. Acesso em: 23 mai. 2020.

BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY. **BCA. Code of Practice on Buildability**, Singapore, 2017.

BUILDING AND CONSTRUCTION AUTHORITY. **BCA. BIM Design for Design for Manufacturing and Assembly Essential Essential Guide**, Singapore, 2016.

BUILDINGSMART. **Information Delivery Manual Guide to Components and Development Methods International Alliance for Interoperability**. [s.l.: s.n.].

Caixa Econômica Federal (CEF). **SINAPI: Catálogo de Composições Analíticas Sinapi de Setembro/2019** Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx#categoria_556>. Acessado em 20 mar. 2020.

CBIC. **Manual Básico de Indicadores de Produtividade na Construção**

Civil. [s.l: s.n.], 2017.

CHOI, J.; KIM, H.; KIM, I. Open BIM-based quantity take-off system for schematic estimation of building frame in early design stage. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 2, n. 1, p. 16–25, 2015.

CHOI, J. O. et al. Critical Success Factors and Enablers for Facility Design Standardization of Capital Projects. **Journal of Management in Engineering**, v. 36, n. 5, p. 40-52, 2020.

CII. **Constructability: A Primer**. Austin: [s.n.], 1983.

CIRIA. **Buildability: An assessment**. London: [s.n.], 1986.

COMPUTER INTEGRATED CONSTRUCTION RESEARCH GROUP. **BIM Project Execution Planning Guide - Version 2.0**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. v. 2.

CONTRADA, F. et al. **An early-design stage assessment method based on constructibility for building performance evaluation**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019

DAMCI, A.; ARDITI, D.; POLAT, G. Resource leveling in line-of-balance scheduling. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 28, n. 9, p. 679–692, 2013.

DAMCI, A.; ARDITI, D.; POLAT, G. Impacts of different objective functions on resource leveling in Line-of-Balance scheduling. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 1, p. 58–67, 2016.

DAS, S.; KANCHANAPIBOON, A. A multi-criteria model for evaluating design for manufacturability. **International Journal of Production Research**, v. 49, n.4, p. 1197-1217, 2011.

ELGHAISH, F.; ABRISHAMI, S. Developing a Framework to Revolutionise the 4D BIM Process: IPD-based Solution. **Construction Innovation**, 2020.

Empresa de Obras Públicas do Rio de Janeiro. **EMOP-RJ**. Boletim e Catálogo de Composição de Preços Unitários EMOP de Julho/2019. Disponível em: <http://www.emop.rj.gov.br/cad_catalogo.asp>. Acessado em: 25 mar. 2020.

EROL, H.; DIKMEN, I.; BIRGONUL, M. T. Measuring the impact of lean construction practices on project duration and variability: A simulation-based study on residential buildings. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 2, p. 241–251, 2017.

FADOUL, A.; TIZANI, W.; KOCHC, C. A. A BIM-based Model for Constructability Assessment of Conceptual Design. **Advances in Computational Design**, v. 3, n. 4, p. 367–384, 2018.

FANG, Y. et al. Case Study of BIM and Cloud-Enabled Real-Time RFID Indoor Localization for Construction Management Applications. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 7, p. 1–12, 2016.

FU, Q.; SHI, X. Research on the IFC-based Data Exchange Method of BIM Information for Precast Concrete Segment. **Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures**, p. 1202–1211, 2019.

GAO, S.; JIN, R.; LU, W. Design for manufacture and assembly in construction : a review. **Building Research & Information**, p. 1–13, 2019.

GAO, S.; LOW, S. P.; NAIR, K. Design for manufacturing and assembly (DfMA): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 14, n. 6, p. 440–456, 2018.

GBADAMOSI, A. et al. A BIM Based Approach for Optimization of Construction and Assembly through Material Selection. v. 2018, n. July, 2018.

GBADAMOSI, A. Q. et al. Offsite construction: Developing a BIM-Based optimizer for assembly. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 1180–1190, 2019.

GEHBAUER, F. EGGENSPERGER, M. NEWTON, S. A. **Planejamento e Gestão de Obras**. 1ª ed. Curitiba: [s.n.], 2002.

GERRISH, T. et al. Using BIM capabilities to improve existing building energy modelling practices. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 24, n. 2, p. 190–208, 2017.

GÓMEZ-ROMERO, J. et al. A fuzzy extension of the semantic Building Information Model. **Automation in Construction**, v. 57, p. 202–212, 2015.

GOUDA, A.; HOSNY, O.; NASSAR, K. Optimal crew routing for linear repetitive projects using graph theory. **Automation in Construction**, v. 81, p. 411–421, 2017.

GRILO, A.; JARDIM-GONCALVES, R. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. **Automation in Construction**, v. 19, n. 5, p. 522–530, 2010.

HAJDASZ, M. Automation in Construction Managing repetitive construction

in a dynamically changing project environment : Conceptualizing the system – model – simulator nexus. **Automation in Construction**, v. 57, p. 132–145, 2015.

HAMDI, O.; LEITE, F. BIM and Lean interactions from the bim capability maturity model perspective: A case study. **IGLC 2012 - 20th Conference of the International Group for Lean Construction**, n. 512, 2012.

HAMZEH, F.; ZANKOUL, E.; ROUHANA, C. How Can “Tasks Made Ready” During Lookahead Planning Impact Reliable Workflow and Project Duration? **Construction Management and Economics**, v. 33, n. 4, p. 243–258, 2015.

HARRIS, R. B.; IOANNOU, P. G. Scheduling projects with repeating activities. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 4, p. 269–278, 1998.

HASMORI, M. F. et al. Significant Factors of Construction Delays Among Contractors in Klang Valley and its Mitigation. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 10, n. 2, 2018.

HASMORI, M. F. et al. **The on-site waste minimization practices for construction waste**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...2020**

HEGAZY, T.; KAMARAH, E. Efficient repetitive scheduling for high-rise construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 134, n. 4, p. 253–264, 2008.

HEIGERMOSER, D. et al. Automation in Construction BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management. **Automation in Construction**, v. 104, n. June 2018, p. 246–254, 2019.

HONG, S. et al. Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 51, p. 34–46, 2015.

HWANG, B. G.; SHAN, M.; LOOI, K. Y. Knowledge-based decision support system for prefabricated prefinished volumetric construction. **Automation in Construction**, v. 94, n. June, p. 168–178, 2018.

IGWE, C.; NASIRI, F.; HAMMAD, A. Construction workspace management: critical review and roadmap. **International Journal of Construction Management**, p. 1–14, 2020.

INDIRA, M.; VENKATA JYOTHSNA, M. An Approach to Effective

Construction Management Based on Lean Construction Techniques. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, n. 4, p. 1954–1959, 2017.

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

IOANNOU, P. G.; YANG, I. T. Repetitive Scheduling Method: Requirements, Modeling, and Implementation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 5, p. 1–13, 2016.

IVSON, P. et al. CasCADE: A Novel 4D Visualization System for Virtual Construction Planning. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 24, n. 1, p. 687–697, 2018.

JEONG, W. S. et al. BIM-integrated construction operation simulation for just-in-time production management. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 11, p. 1–25, 2016.

KANNAN, M. R.; SANTHI, M. H. Constructability Assessment of Climbing Formwork Systems Using Building Information Modeling. **Procedia Engineering**, v. 64, p. 1129–1138, 2013.

KANNAN, M. R.; SANTHI, M. H. Automated constructability rating framework for concrete formwork systems using building information modeling. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 4, p. 387–413, 2018.

KASSEM, M.; DAWOOD, N.; CHAVADA, R. Construction workspace management within an Industry Foundation Class-Compliant 4D tool. **Automation in Construction**, v. 52, p. 42–58, 2015.

KIM, K.; CHO, Y. K. Construction-specific spatial information reasoning in Building Information Models. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, n. 4, p. 1013–1027, 2015.

KIM, K.; CHO, Y.; ZHANG, S. Integrating work sequences and temporary structures into safety planning: Automated scaffolding-related safety hazard identification and prevention in BIM. **Automation in Construction**, v. 70, p. 128–142, 2016.

KITCHENHAM, B. CHARTERS, S. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in SE**. UK: [s.n.], 2007.

KOSKELA, L. et al. IF CPM IS SO BAD , WHY HAVE WE BEEN USING IT SO LONG ? p. 27–37, [s.d.], 2014.

LEE, C.; HAM, S. Automated system for form layout to increase the proportion of standard forms and improve work efficiency. **Automation in Construction**, v. 87, n. January, p. 273–286, 2018.

LEE, J. W. et al. Process for Integrating Constructability into the Design Phase in High-Rise Concrete Buildings: Focused on Temporary Work. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, 2018.

LEITE, M. O.; POSSAMAI, O.; HEINECK, L. F. M. A Utilização das Curvas de Aprendizagem no Planejamento da Construção Civil. **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2004.

LIMMER, C. V. **Planejamento, Orçamentação e Controle de Projetos e obras**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LUCKO, G.; ALVES, T. D. C. L.; ANGELIM, V. L. Challenges and opportunities for productivity improvement studies in linear, repetitive, and location-based scheduling. **Construction Management and Economics**, v. 32, n. 6, p. 575–594, 2014.

LUCKO, G.; GATTEI, G. Line-of-balance against linear scheduling: Critical comparison. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Management, Procurement and Law**, v. 169, n. 1, p. 26–44, 2016.

MAHAMADU, A.-M. et al. Addressing challenges to building information modelling implementation in UK: designers' perspectives. **Journal of Construction Project Management and Innovation**, v. 7, n. Supplement 1, p. 1908–1932, 2017.

MATTOS, A. D. **Planejamento e Controle de Obras**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2010.

MENDES JUNIOR, R. **Programação da Produção na Construção de Edifícios de Múltiplos Pavimentos**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

MUÑOZ, I.; TAKAYANAGUI, A. .; SANTOS, C. **Revisão sistemática de Literatura e Metanálise: Noções Básicas sobre seu Desenho, Interpretação e Aplicação na Área da Saúde**. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000052002000200010&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 16 abr. 2020.

NAJAFI, A.; KONG, R. T. L. Productivity Analysis of Precast Concrete Operations by Artificial Neural Networks. **ARP Journal of Engineering and**

Applied Sciences, v. 11, n. 17, p. 10512–10521, 2016.

NAOUM, S. G. Factors influencing labor productivity on construction sites: A state-of-the-art literature review and a survey. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 65, n. 3, p. 401–421, 2016.

NARLOCH, T. **Modelo Indicador da Construtibilidade a Partir da Análise Geométrica do Projeto**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

NATH, T. et al. Productivity improvement of precast shop drawings generation through BIM-based process re-engineering. **Automation in Construction**, v. 54, p. 54–68, 2015.

NEVES, J.; SAMPAIO, Z.; VILELA, M. A case study of BIM implementation in rail track rehabilitation. **Infrastructures**, v. 4, n. 1, 2019.

O'CONNOR, J. T. et al. Critical Success Factors and Enablers for Optimum and Maximum Industrial Modularization. n. Cii 2002, p. 1–11, 2014.

O'CONNOR, J. T.; O'BRIEN, W. J.; CHOI, J. O. Standardization strategy for modular industrial plants. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 141, n. 9, p. 1–10, 2015.

OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, R. R.; HAMERSKI, A. Estudo de Indicadores de Qualidade em Obras Repetitivas. **Encontro Nacional de Tecnologia do ambiente Construído**, 1998a.

OLIVEIRA, R. R.; DALL'OGGIO, S. HAMERSKI, A.; MARTINI, C. E. **Estudo de Fatores que Afetam a Produtividade em Obras Repetitivas**. Congresso Latino-Americano de Tecnologia e Gestão da Produção de Edifícios. São Paulo: 1998b.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE PMI. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos** (Guia PMBOK®). 5. ed. Pensilvânia: PMI Inc., 2013.

SACKS, R. et al. Sacks2010.Pdf. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 136, n. 9, p. 968–980, 2010.

SACKS, R. et al. Construction flow index: a metric of production flow quality in construction. **Construction Management and Economics**, v. 35, n. 1–2, p. 45–63, 2017.

SAIEG, P. et al. Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A

systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 788–806, 2018.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de Revisão Sistemática: um Guia para Síntese Criteriosa da Evidência Científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007.

SANTOS, M. M. **Plano certoiro. Guia da Construção**. [s.l.] PINI, 2008.

SAUNDERS, M.; LEWIS, P.; THORNHILL, A. **Research Methods for Business Students**. [s.l: s.n.], 2008.

SENGER, E. W. **Método para Quantificação do Valor Percebido por Construtores para Sistema de Banheiros Pré-Fabricados: Redução do Cronograma**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2018.

SEPPÄNEN, O. A. **Comparison of Takt Time and LBMS Planning Methods**. Annual Conference International Group for Lean Construction.Oslo: 2014.

SIGALOV, K.; KÖNIG, M. Recognition of Process Patterns for BIM-based Construction Schedules. **Advanced Engineering Informatics**, v. 33, p. 456–472, 2017.

SU, Y.; LUCKO, G. Linear scheduling with multiple crews based on line-of-balance and productivity scheduling method with singularity functions. **Automation in Construction**, v. 70, p. 38–50, 2016.

TAURIAINEN, M. PUTTONEN, J. A.; SAARI, A. J. The Assessment of Constructability: BIM Cases. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 20, p. 51–67, 2015.

TAURIAINEN, M. et al. The effects of BIM and lean construction on design management practices. **Procedia Engineering**, v. 164, n. June, p. 567–574, 2016.

TOKDEMIR, O. B.; EROL, H.; DIKMEN, I. Delay Risk Assessment of Repetitive Construction Projects Using Line-of-Balance Scheduling and Monte Carlo Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 145, n. 2, p. 1–12, 2019.

TOMAR, A.; BANSAL, V. K. Scheduling of repetitive construction projects using geographic information systems: an integration of critical path method and line of balance. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 4, p. 549–562, 2019a.

TOMAR, A.; BANSAL, V. K. Generation, visualization, and evaluation schedule of repetitive construction projects using GIS. **International Journal of**

Construction Management, p. 1–16, 2019b.

TORRES-CALDERON, W. ET AL. Automated Mining of Construction Schedules for Easy and Quick Assembly of 4D BIM Simulations. **Computing in Civil Engineering**, 2019.

TRESIDDER, M.; WHITE, P. Design for Manufacture and Off-site Construction at Woolston Wastewater Treatment Works (UK). **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Management, Procurement and Law**, v. 171, n. 4, p. 137–140, 2018.

UNGUREANU, L. C.; HARTMANN, T.; SERBANOIU, I. Quantitative Lean Assessment of Line of Balance Schedules Quality. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 26, n. 2, p. 224–244, 2019.

VARGAS, F. B. DE; FORMOSO, C. T. Método para planejamento e controle da produção baseado em zonas de trabalho com o apoio de BIM. p. 129–151, 2020.

WANG, Y.; YUAN, Z.; SUN, C. Research on assembly sequence planning and optimization of precast concrete buildings. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 24, n. 2, p. 106–115, 2018.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the Past to Prepare for the Future : Writing a Literature Review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, 2002.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology**, Cologny, Switzerland (2016), pp. 01-61. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf>. Acessado em: 14 mai. 2020.

XUE, H. et al. Capital cost optimization for prefabrication: A factor analysis evaluation model. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 1, p. 1–22, 2018.

YUAN, Z.; SUN, C.; WANG, Y. Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. **Automation in Construction**, v. 88, n. April 2016, p. 13–22, 2018.

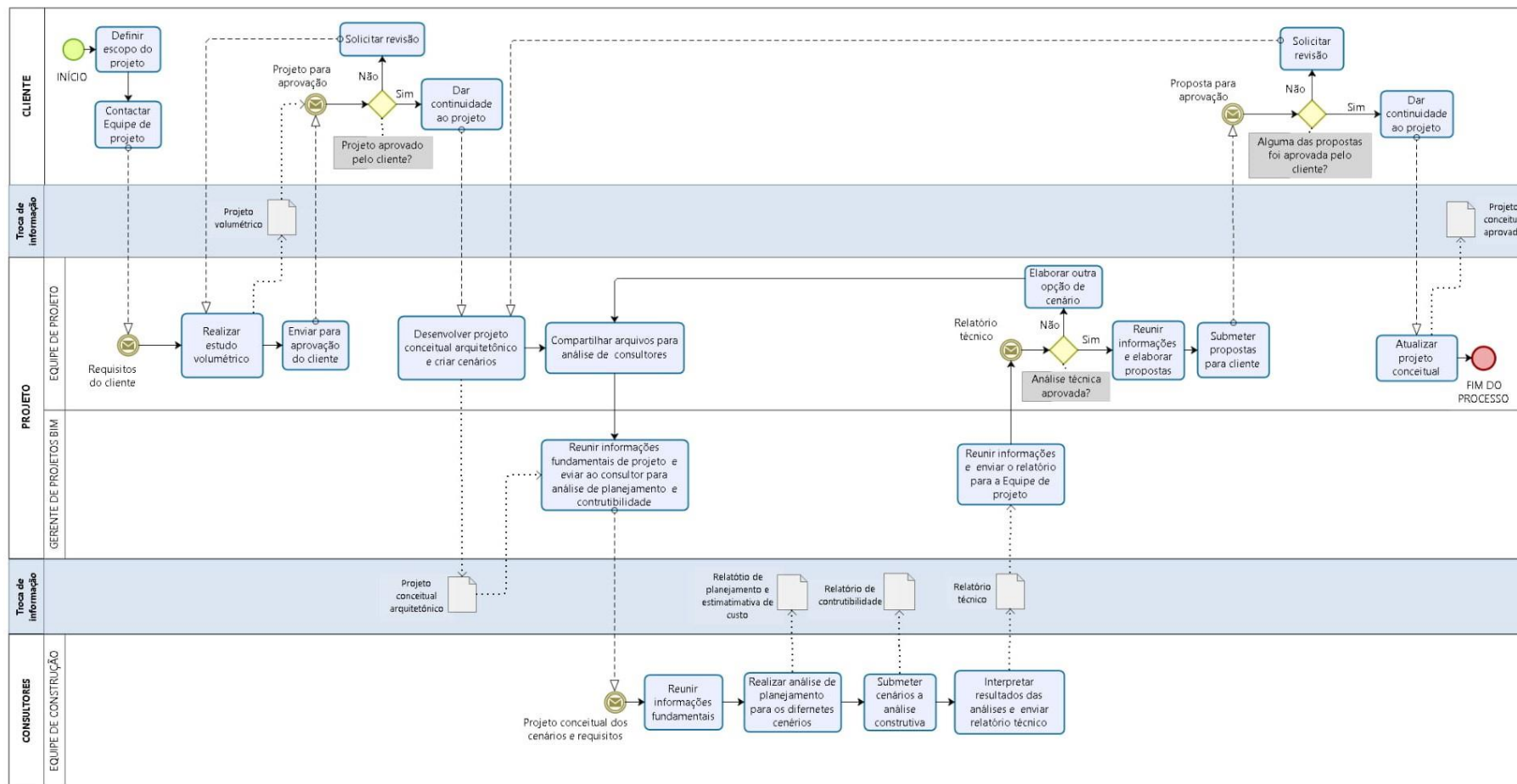
ZHANG, C. ET AL. Quantitative Assessment of Building Constructability Using BIM and 4D Simulation. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 6, n. 442–461, 2016.

ZHANG, L.; CHEN, X.; SUO, Y. Interrelationships among critical factors of work flow reliability in lean construction. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 5, p. 621–632, 2017.

ZHANG, S. et al. Workforce location tracking to model, visualize and analyze workspace requirements in building information models for construction safety planning. **Automation in Construction**, v. 60, p. 74–86, 2015.

ZOLFAGHARIAN, S.; IRIZARRY, J. Constructability Assessment Model for Commercial Building Designs in the United States. v. 143, n. 8, p. 1–10, 2017.

Apêndice A



Apêndice B

Tabela B- 1 Relação das composições unitárias atribuídas para o projeto de estrutura de concreto moldada in loco.

Serviço	Descrição	Unidade	Custo produto	Consumo	Preço	Tabela	Ano ref.
C92763	ARMACAO DE PILAR OU VIGA DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UM EDIFICIO DE MULTIPLOS PAVIMENTOS UTILIZANDO ACO CA-50 DE 12,5 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG			6,88	SINAPI	2019/09
43132	ARAME RECOZIDO 18 BWG, 1,25 MM (0,01 KG/M)	KG	12,9	0,025	0,32	SINAPI	2019/09
39017	ESPACADOR/DISTANCIADOR CIRCULAR COM ENTRADA LATERAL, EM PLASTICO PARA VERGALHAO *4,5 A 12,5 MM, COBRIMENTO 20 MM	UN	0,25	0,367	0,09	SINAPI	2019/09
C88238	AJUDANTE DE ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	19,56	0,0063	0,12	SINAPI	2019/09
C88245	ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	25,04	0,038	0,96	SINAPI	2019/09
C92795	CORTE E DOBRA DE ACO CA-50, DIAMETRO DE 12,5 MM, UTILIZADO EM ESTRUTURAS DIVERSAS, EXCETO LAJES AF_12/2015	KG	5,39	1	5,39	SINAPI	2019/09
C92771	ARMACAO DE LAJE DE UMA ESTRUTURA CONVENCIONAL DE CONCRETO ARMADO EM UM EDIFICIO DE MULTIPLOS PAVIMENTOS UTILIZANDO ACO CA-50 DE 10,0 MM - MONTAGEM. AF_12/2015	KG			7,10	SINAPI	2019/09
43132	ARAME RECOZIDO 18 BWG, 1,25 MM (0,01 KG/M)	KG	12,9	0,025	0,32	SINAPI	2019/09
39017	ESPACADOR/DISTANCIADOR CIRCULAR COM ENTRADA LATERAL, EM PLASTICO PARA VERGALHAO *4,5 A 12,5 MM, COBRIMENTO 20 MM	UN	0,25	0,357	0,09	SINAPI	2019/09
C88238	AJUDANTE DE ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	19,56	0,0057	0,11	SINAPI	2019/09
C88245	ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	25,04	0,0348	0,87	SINAPI	2019/09

C92803	CORTE E DOBRA DE ACO CA-50, DIAMETRO DE 12,5 MM, UTILIZADO EM ESTRUTURAS DIVERSAS, EXCETO LAJES AF_12/2015	KG	5,72	1	5,72	SINAPI	2019/09
C92414	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FÔRMA DE PILARES RETANGULARES E ESTRUTURAS SIMILARES COM ÁREA MÉDIA DAS SEÇÕES MENOR OU IGUAL A 0,25 M², PÉ-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_12/2015	M²			111,47	SINAPI	2019/09
C92263	FABRICAÇÃO DE FÔRMA PARA PILARES E ESTRUTURAS SIMILARES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, E = 17 MM. AF_12/2015	M²	108,18	0,525	56,79	SINAPI	2019/09
C88239	AJUDANTE DE CARPINTEIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	20,95	0,271	5,67	SINAPI	2019/09
C88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,72	1,478	36,53	SINAPI	2019/09
2692	DESMOLDANTE PROTETOR PARA FORMAS DE MADEIRA, DE BASE OLEOSA EMULSIONADA EM AGUA	L	6,39	0,01	0,06	SINAPI	2019/09
40271	LOCACAO DE APRUMADOR METALICO DE PILAR, COM ALTURA E ANGULO REGULAVEIS, EXTENSAO DE *1,50* A *2,80* M	MÊS	11,05	0,196	2,16	SINAPI	2019/09
40287	LOCACAO DE BARRA DE ANCORAGEM DE 0,80 A 1,20 M DE EXTENSAO, COM ROSCA DE 5/8", INCLUINDO PORCA E FLANGE	MÊS	4,25	0,785	3,33	SINAPI	2019/09
40275	LOCACAO DE VIGA SANDUICHE METALICA VAZADA PARA TRAVAMENTO DE PILARES, ALTURA DE *8* CM, LARGURA DE *6* CM E EXTENSAO DE 2 M	MÊS	17	0,393	6,68	SINAPI	2019/09
40304	PREGO DE ACO POLIDO COM CABECA DUPLA 17 X 27 (2 1/2 X 11)	KG	13,68	0,019	0,25	SINAPI	2019/09
C92451	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FORMA DE VIGA, ESCORAMENTO COM GARFO DE MADEIRA, PE-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES.AF_12/2015	M²			124,56	SINAPI	2019/09
2692	DESMOLDANTE PROTETOR PARA FORMAS DE MADEIRA, DE BASE OLEOSA EMULSIONADA EM AGUA	L	6,39	0,01	0,06	SINAPI	2019/09
6193	TABUA DE MADEIRA NÃO APARELHADA*2,5X20*CM, CEDRINHO OU EQUIVALENTE DA REGIAO	M	8,02	0,474	3,8	SINAPI	2019/09

40304	PREGO DE ACO POLIDO COM CABECA DUPLA 17 X 27 (2 1/2 X 11)	KG	13,68	0,049	0,67	SINAPI	2019/09
C88239	AJUDANTE DE CARPINTEIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	20,95	0,205	4,29	SINAPI	2019/09
C88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,72	1,12	27,68	SINAPI	2019/09
C92265	FABRICACAO DE FORMA PARA VIGAS EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, E = 17 MM. AF_12/2015	M ²	84,75	0,621	52,62	SINAPI	2019/09
C92272	FABRICACAO DE ESCORAS DE VIGA DO TIPO GARFO EM MADEIRA. AF_12/2015	M	19,52	1,816	35,44	SINAPI	2019/09
C92510	MONTAGEM E DESMONTAGEM DE FORMA DE LAJE MACICA COM AREA MEDIA MAIOR QUE 20 M², PE-DIREITO SIMPLES, EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, 2 UTILIZAÇÕES. AF_12/2015	M²			41,49	SINAPI	2019/09
2692	DESMOLDANTE PROTETOR PARA FORMAS DE MADEIRA DE BASE OLEOSA EMULSIONADA EM AGUA	L	6,39	0,01	0,06	SINAPI	2019/09
10749	LOCACAO DE ESCORA METALICA TELESCOPICA, COM ALTURA REGULAVEL DE *1,80* A *3,20*M COM CAPACIDADE DE CARGA DE NO MINIMO 1000 KGF (10KN)	MÊS	7,79	0,397	3,09	SINAPI	2019/09
40270	VIGA DE ESCORAMENTO H20 DE MADEIRA PESO DE 5,00 A 5,20 KG/M, COM EXTREMIDADES PLASTICAS	M	43,5	0,03	1,30	SINAPI	2019/09
C88239	AJUDANTE DE CARPINTEIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	20,95	0,126	2,63	SINAPI	2019/09
C88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,72	0,687	16,98	SINAPI	2019/09
C92267	FABRICACAO DE FORMA PARA LAJES EM CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA, E= 25MM. AF_12/2015	M ²	30,17	0,577	17,41	SINAPI	2019/09
C92719	CONCRETAGEM DE PILARES, FCK = 25 MPA, COM USO DE GRUA EM EDIFICACAO COM SECAO MEDIA DE PILARES MENOR OU IGUAL A 0,25 M² - LANÇAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_12/2015	M³			329,39	SINAPI	2019/09
34493	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C25, COM BRITA 0 E 1, SLUMP=100 +/-20 MM, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	M ³	263,42	1,103	290,55	SINAPI	2019/09

C88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,72	0,353	8,72	SINAPI	2019/09
C88309	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	25,18	0,353	8,88	SINAPI	2019/09
C88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	19,85	1,059	21,02	SINAPI	2019/09
C90586	VIBRADOR DE IMERSAO, DIAMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELETRICO TRIFASICO POTENCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF_06/2015	CHP	1,18	0,143	0,16	SINAPI	2019/09
C90587	VIBRADOR DE IMERSAO, DIAMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELETRICO TRIFASICO POTENCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF_06/2015	CHI	0,29	0,21	0,06	SINAPI	2019/09
C92740	CONCRETAGEM DE VIGAS E LAJES, FCK=20 MPA, PARA LAJES MACICAS OU NERVURADAS COM GRUA DE CACAMBA DE 500 L EM EDIFICACAO DE MULTIPAVIMENTOS ATE 16 ANDARES, COM AREA MEDIA DE LAJES MAIOR QUE 20 M² - LANCAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_12/2015	M³			316,82	SINAPI	2019/09
34492	CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C20, COM BRITA 0 E 1, SLUMP=100 +/-20 MM, INCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	M³	253,59	1,103	279,70	SINAPI	2019/09
C88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,72	0,192	4,74	SINAPI	2019/09
C88309	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	25,18	0,769	19,36	SINAPI	2019/09
C88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	19,85	0,65	12,90	SINAPI	2019/09
C90586	VIBRADOR DE IMERSAO, DIAMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELETRICO TRIFASICO POTENCIA DE 2 CV - CHP DIURNO. AF_06/2015	CHP	1,18	0,093	0,10	SINAPI	2019/09
C90587	VIBRADOR DE IMERSAO, DIAMETRO DE PONTEIRA 45MM, MOTOR ELETRICO TRIFASICO POTENCIA DE 2 CV - CHI DIURNO. AF_06/2015	CHI	0,29	0,1	0,02	SINAPI	2019/09

Tabela B- 2 Relação das composições unitárias atribuídas para o projeto de estrutura de concreto pré-fabricada.

Serviço	Descrição	Und	Custo produto	Consumo EMOP-RJ	Preço SINAPI	Tabela	Ano ref.
C11.060.0410-0	ESTRUTURA PRE-FABRICADA EM CONCRETO ARMADO/PROTENDIDO, COM FCK>=30MPA, PARA OBRAS PREDIAIS ATÉ QUATRO PAVIMENTOS, COM PILARES, VIGAS PRINCIPAIS E SECUNDARIAS, LAJES, PATAMARES E RAMPAS DE ACESSO, CONSIDERANDO A CONFECCAO DAS PECAS, INCLUSIVE O FORNECIMENTO DOS MATERIAIS, INCLUSIVE O TRANSPORTE DAS PECAS PARA O CANTEIRO DE OBRAS E EXCLUSIVE A MONTAGEM	M²			400,49	EMOP-RJ	2019/07
367	AREIA GROSSA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	M³	70	0,1034	7,24	SINAPI	2019/09
43132	ARAME RECOZIDO 18 BWG, 1,25 MM (0,01 KG/M)	KG	11,8	2,3148	27,31	SINAPI	2019/09
40424	CHAPA DE ACO CARBONO LAMINADO A QUENTE, QUALIDADE ESTRUTURAL, BITOLA 3/16", E =4,75 MM (37,29 KG/M2)	KG	4,98	0,41	2,04	SINAPI	2019/09
1379	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II-32	KG	0,56	79,3876	44,46	SINAPI	2019/09
1355	CHAPA DE MADEIRA COMPENSADA RESINADA PARA FORMA DE CONCRETO, DE *2,2 X 1,1* M, E = 14 MM	M²	29,31	0,109	3,19	SINAPI	2019/09
10999	ELETRODO REVESTIDO AWS - E6013, DIAMETRO IGUAL A 4,00 MM	KG	17,7	0,0388	0,69	SINAPI	2019/09
14250	ENERGIA ELETRICA COMERCIAL, BAIXA TENSÃO, RELATIVA AO CONSUMO DE ATÉ 100 KWH, INCLUINDO ICMS, PIS/PASEP E COFINS	KW/H	0,85	1,38	1,17	SINAPI	2019/09
41954	CABO DE ACO GALVANIZADO, DIAMETRO 9,53 MM (3/8"), COM ALMA DE FIBRA 6 X 25 F (COLETADO CAIXA)	M	10,33	4,7382	48,95	SINAPI	2019/09
43055	ACO CA-50, 12,5 MM, VERGALHAO	KG	4,54	2,3816	10,81	SINAPI	2019/09

37514	MINICARREGADEIRA SOBRE RODAS, POTENCIA LIQUIDA DE *47* HP, CAPACIDADE NOMINAL DE OPERACAO DE *646* KG	UN	144.877,50	0,00007	10,14	SINAPI	2019/09
123	ADITIVO IMPERMEABILIZANTE DE PEGA NORMAL PARA ARGAMASSAS E CONCRETOS SEM ARMACAO	KG	6,91	1,4958	10,34	SINAPI	2019/09
4721	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 A 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	M³	70,82	0,117305	8,31	SINAPI	2019/09
C92724	CONCRETAGEM DE VIGAS E LAJES, FCK=20 MPA, PARA LAJES PREMOLDADAS COM USO DE BOMBA EM EDIFICACAO COM AREA MEDIA DE LAJES MAIOR QUE 20 M² - LANCAMENTO, ADENSAMENTO E ACABAMENTO. AF_12/2015	M³	313,50	0,4533	142,11	SINAPI	2019/09
37761	CAMINHAO TOCO, PESO BRUTO TOTAL 16.000 KG, CARGA UTIL MAXIMA DE 10.685 KG, DISTANCIA ENTRE EIXOS 4,80 M, POTENCIA 189 CV EXCLUSIVE CARROCERIA - MATERIAIS NA OPERACAO. AF_06/2014	H	88,39	0,0227	2,01	SINAPI	2019/09
10712	GUINDAUTO HIDRAULICO, CAPACIDADE MAXIMA DE CARGA 3300 KG, MOMENTO MAXIMO DE CARGA 5,8 TM, ALCANCE MAXIMO HORIZONTAL 7,60 M, INCLUSIVE CAMINHAO TOCO PBT 16.000 KG, POTENCIA DE 189 CV - MATERIAIS NA OPERACAO. AF_03/2016	H	88,39	0,1369	12,10	SINAPI	2019/09
36487	GUINCHO ELETRICO DE COLUNA, CAPACIDADE 400 KG, COM MOTO FREIO, MOTOR TRIFASICO DE 1,25 CV - MATERIAIS NA OPERACAO. AF_03/2016	H	0,61	0,8372	0,51	SINAPI	2019/09
C88245	ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,23	0,4345	10,53	SINAPI	2019/09
C88262	CARPINTEIRO DE FORMAS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,72	0,2173	5,37	SINAPI	2019/09
C88297	OPERADOR DE MAQUINAS E EQUIPAMENTOS COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	25,07	0,57	14,29	SINAPI	2019/09
C88315	SERRALHEIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	24,23	0,4345	10,53	SINAPI	2019/09
C88316	SERVENTE COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	19,85	1,43	28,39	SINAPI	2019/09

C11.060.0415-0	ESTRUTURA PRE-FABRICADA EM CONCRETO ARMADO/PROTENDIDO, COM FCK>=30MPA, PARA OBRAS PREDIAIS ATÉ QUATRO PAVIMENTOS, COM PILARES, VIGAS PRINCIPAIS E SECUNDARIAS, LAJES, CONSIDERANDO A MONTAGEM, EXCLUSIVE A CONFECCAO DAS PECAS	M²			115,41	EMOP-RJ	2019/07
37748	CAMINHAO TOCO, PBT 14.300 KG, CARGA UTIL MAX. 9.710 KG, DIST. ENTRE EIXOS 3,56 M, POTENCIA 185 CV, INCLUSIVE CARROCERIA FIXA ABERTA DE MADEIRA P/ TRANSPORTE GERAL DE CARGA SECA, DIMEN.	H	86,39	0,06158	5,32	SINAPI	2019/09
25952	GUINDASTE HIDRAULICO AUTOPROPELIDO, COM LANCA TELESCOPICA 28,80 M, CAPACIDADE MAXIMA 30 T, POTENCIA 97 KW, TRACAO 4 X 4 - MATERIAIS NA OPERACAO. AF_11/2014	H	61,63	0,105	6,47	SINAPI	2019/09
10712	GUINDAUTO HIDRAULICO, CAPACIDADE MAXIMA DE CARGA 3300 KG, MOMENTO MAXIMO DE CARGA 5,8 TM, ALCANCE MAXIMO HORIZONTAL 7,60 M, INCLUSIVE CAMINHAO TOCO PBT 16.000 KG, POTENCIA DE	H	88,39	0,06158	5,44	SINAPI	2019/09
C88243	AJUDANTE ESPECIALIZADO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	22,92	3,0116	69,03	SINAPI	2019/09
C88297	OPERADOR DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	H	24,42	0,2148	5,25	SINAPI	2019/09
C90779	ENGENHEIRO CIVIL DE OBRA SENIOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	122,32	0,19535	23,90	SINAPI	2019/09

Apêndice C

Tabela C-1 Lista de verificação desenvolvida para análise construtiva.

SIMPLIFICAÇÃO DO PROJETO				
CATEGORIA	DESCRIÇÃO DA CATEGORIA	SIM	NÃO	N/A
Simplificação do layout.	Inexistência de inclinações, superfícies curvas, recortes e ângulos diferentes de 90 ° no <i>layout</i> do projeto.			
Acabamento do elemento estrutural no canteiro.	Previu-se que os elementos estruturais não requeiram algum acabamento, ajuste no canteiro.			
Técnica de construção originadas do projeto.	Utilizou-se elementos pré-fabricado ou pré-moldados no projeto estrutural.			
Materiais de construção.	Utilizou-se no projeto matérias convencionais, tais como: concreto fck=20, fck=30, aço CA-50.			
Simplificação da configuração de elementos.	Utilizou-se elementos estruturais de geometria complexa (seção que não seja retangular).			
Diferenciação do comprimento dos elementos pré-fabricados.	Os elementos pré-fabricados possuem tamanhos diferenciados e de fácil visualização de modo a evitar confusão no canteiro de obra.			

PADRONIZAÇÃO DO PROJETO				
CATEGORIA	DESCRIÇÃO DA CATEGORIA	SIM	NÃO	N/A
Padronização de elementos.	Minimizou-se a variedade de dimensões e formas das peças estruturais moldadas in loco ou pré-fabricada.			
Repetição do pé-direito.	Houve repetição da altura do pé-direito nos diferentes pavimentos da edificação.			
Repetição do layout estrutural.	Houve repetição do layout estrutural em diferentes pavimentos.			
Formas.	Previu-se a utilizou-se formas reutilizáveis.			

PRODUTIVIDADE NO CANTEIRO DE OBRA				
CATEGORIA	DESCRIÇÃO DA CATEGORIA	SIM	NÃO	N/A
Furo em peças.	Previu-se furos em elementos pré-fabricados para facilitar içamento no canteiro de obra.			
Restrição de transporte de elementos pré-fabricados.	Utilizou-se elementos pré-fabricados de comprimento $\leq 12m$.			
Segurança dos trabalhadores.	Maximizou-se o volume de trabalho conduzido fora do canteiro de obra.			
Restrições e transporte de componentes.	Evitou-se operações dentro e fora do canteiro de obra que possam danificar componentes estruturais. Exemplo: transporte de peças pré-fabricadas.			

SEQUÊNCIA DE PROCESSOS E INTERDEPENDÊNCIA ENTRE ATIVIDADES				
CATEGORIA	DESCRIÇÃO DA CATEGORIA	SIM	NÃO	N/A
Projetar o processo de montagem.	Houve planejamento do processo para facilitar montagem dos elementos no canteiro de obra.			
Condições climáticas.	Reduziu-se atividades realizadas ao ar livre que possam ser atrapalhadas por condições climáticas.			
Mão de obra.	Eliminou-se a necessidade de mão de obra especializada em atividades realizadas no canteiro de obra.			
Atividades paralelas.	Adotou-se soluções de projeto que permitam simultaneidade de atividade durante a execução (por exemplo: utilização de elementos pré-fabricados).			
Minimização de componentes.	Minimizou-se o número de componentes e partes que diminuam o tempo das atividades.			
Equipamento.	Minimizou-se o uso de equipamento, tais como, guindaste, gruas que precisem de maior planejamento no canteiro para realizar atividade.			
Atividades repetitivas.	Promoveu-se atividades repetitivas de modo que o trabalhador possa empregar habilidades adquiridas anteriormente durante montagem.			

BOAS PRATICAS DA INDÚSTRIA				
CATEGORIA	DESCRIÇÃO DA CATEGORIA	SIM	NÃO	N/A
Informações de projeto.	Disponibilizou-se informações sobre dimensão, volume, área de elementos estruturais.			
Metodologia BIM.	Utilizou-se a metodologia BIM durante o processo.			
Tecnologias/praticas.	Utilizou-se de tecnologia, métricas que melhorassem a produtividade no canteiro de obra.			