

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Renato Alexandre Costa Freitas

**Uma Proposta para Melhoria do Planejamento e Controle da
Produção em Projetos de Construção Civil**

Fortaleza – CE

15 de junho de 2024

Renato Alexandre Costa Freitas

Uma Proposta para Melhoria do Planejamento e Controle da Produção em Projetos de Construção Civil

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Linha de Pesquisa: Computação Aplicada

Orientador: Profa. Dra. Carina Teixeira de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PRPI)

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PPGCC)

Fortaleza – CE

15 de junho de 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F862p Freitas, Renato Alexandre Costa.
Uma Proposta para Melhoria do Planejamento e Controle da Produção em Projetos de Construção Civil
Fortaleza ? CE 15 de junho de 2024 / Renato Alexandre Costa Freitas. - 2022.
65 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Ciência da Computação, Campus
Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Carina Teixeira de Oliveira.

1. sistemas web. 2. gestão de obras. 3. lean construction. 4. planejamento. 5. construção. I. Título.
CDD 004



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)
Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PRPI)
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PPGCC)

Renato Alexandre Costa Freitas

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, sendo aprovada pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Orientador: Profa. Dra. Carina Teixeira de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Reinaldo Braga Bezerra

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Tales Paiva Nogueira

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira (Unilab)

Fortaleza – CE
15 de junho de 2024

Agradecimentos

Os agradecimentos principais são direcionados à minha esposa Claudeniza, que me apoiou desde o processo de inscrição no programa de mestrado e por toda a contribuição nas inúmeras revisões e correções desta produção. Estes agradecimentos também são estendidos aos meus filhos por compreenderem a minha indisponibilidade durante esta jornada.

Agradecimentos especiais à minha orientadora Professora Dra. Carina Teixeira de Oliveira, por toda a paciência e cuidado que teve em indicar a direção correta que o trabalho deveria tomar e principalmente por não permitir que eu desistisse.

Também não posso deixar de agradecer imensamente ao Professor Dr. Reinaldo Bezerra Braga e o Professor Dr. Antônio Mauro Barbosa de Oliveira, por todas as oportunidades que me foram dadas nesta caminhada.

Agradecimentos ao Professor Tales Paiva Nogueira que tão gentilmente aceitou participar da banca examinadora e colaborar com esta dissertação através de seus importantes comentários na qualificação.

Agradecimentos aos colaboradores da empresa Quanta Consultoria que muito contribuíram com o fornecimento de conteúdos importantes, em especial para o Arthur Bezerra, líder técnico e responsável por toda a tecnologia do projeto Bentham.

A todos os membros do LAR que participaram do desenvolvimento do Bentham, destacando principalmente Marcos Antônio e Victor por terem contribuído diretamente na implementação da prova de conceito.

Agradecimentos aos meus amigos Thiago Felipe e Marisergio Alves, que estiveram sempre presentes quando os obstáculos surgiam na implementação e desenvolvimento desta dissertação.

Obrigado Professor Frank Pereira por toda a dedicação e paciência ao me ensinar inglês.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Este trabalho aborda as práticas e metodologias de planejamento e controle da produção na construção civil. A indústria da construção tem adotado Tecnologias da Informação e Comunicação para apoio à tomada de decisões. No entanto, alguns desafios ainda estão abertos neste campo de pesquisa. Neste estudo, buscou-se entender as práticas de gestão adotadas nas empresas de construção e identificar alguns sistemas de gestão destas empresas. Além disso, outro aspecto observado no estudo foi a importância dos indicadores de desempenho utilizados para o setor. Em um ambiente repleto de incertezas, os atrasos nos cronogramas afetam diretamente os orçamentos e precisam ser sanados. Os sistemas informatizados de gestão não evitam atrasos nos cronogramas. Portanto, adotar uma metodologia como a *Last Planner System* apresentou-se adequada para se alcançar uma maior assertividade no planejamento e controle da produção. Neste trabalho, é apresentada uma proposta para melhoria do planejamento e controle da produção em projetos de construção civil, utilizando o sistema web e *mobile* do Bentham Obras para prova de conceito. A partir do módulo intitulado Controle e Planejamento do Bentham Obras, os *stakeholders* podem acompanhar o andamento da produção. O diferencial da solução apresentada neste trabalho é disponibilizar indicadores de produção. Combinadas aos indicadores, Funções de Singularidade são utilizadas, permitindo projetar cenários que podem indicar atrasos em uma tarefa específica. Ao registrar as atividades realizadas diariamente, a solução apresenta um *dashboard* com vários indicadores importantes para o acompanhamento do andamento da obra. Em uma única tela o usuário pode observar: taxa de produção esperada, taxa de produção atual, taxa de produção ideal, percentual de plano concluído e índice de confiabilidade do planejamento. A partir da taxa de produção identificada, o usuário pode observar em um gráfico o dia provável para conclusão de cada atividade. O gráfico também indica uma curva representando quando a atividade será concluída caso alguma medida de melhoria da taxa de produção seja tomada.

Palavras-chave: *lean construction*, planejamento, controle, atraso, sistema web e *mobile*, construção civil

Abstract

This study addresses practices and methodologies of Production Planning and Control in the construction industry. The construction industry has adopted Information and Communication Technologies to support decision-making processes. However, some challenges in this field of research are still to be met. Therefore, this study tried to understand the management practices adopted by construction companies, as well as identify some of the management systems of those companies. Besides management systems, another aspect observed in the literature is the importance of performance indicators used in the sector. In an environment of uncertainty, delays in schedules directly affect budgets and need to be remedied. Management systems do not prevent delays in schedules. Therefore, adopting a methodology such as the Last Planner System is adequate to achieve greater assertiveness in Production Planning and Control. However, a model was implemented so that the solution was aligned with lean methodologies. Therefore, from the control and planning module, stakeholders can follow the production progress. The differential of the implementation carried out in the Bentham system is the availability of production indicators. Combined with the indicators, the Singularity Functions allow projection of scenarios that may indicate delays in a specific task. By recording the activities performed on a daily basis, the application presents a dashboard with various important indicators for monitoring the progress of the work. On a single screen the user can observe: expected production rate, current production rate, ideal production rate, percentage of completed plan, and planning reliability index. From the identified production rate, the user can observe on the graph the probable day for completion of the activity. The graph also indicates a curve representing when the activity will be completed if any measure to improve the production rate is taken. Finally, a case study is presented to demonstrate the feasibility of applying the proposed methodology in the Bentham Obras system.

Keywords: lean construction, planning, control, delay, web system.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de modelo BIM - Dutos de um sistema de ventilação.	25
Figura 2 – Estágios do planejamento no <i>Last Planner System</i> (LPS).	28
Figura 3 – Exemplo de carregamento trapezoidal	31
Figura 4 – Exemplo de carregamento triangular e uniforme	32
Figura 5 – Gráfico de acompanhamento do andamento da atividades	33
Figura 6 – Pseudocódigo - Função sem melhoria	34
Figura 7 – Pseudocódigo - Função com melhoria	35
Figura 8 – Exemplo de tela do Bentham Obras web.	40
Figura 9 – Exemplo de tela do Bentham Obras móvel.	41
Figura 10 – Exemplo de parte de um cronograma físico-financeiro de uma obra real da IC.	45
Figura 11 – Modelo Conceitual do Banco de Dados após a inclusão das novas entidades.	48
Figura 12 – Exemplo de tela de um Produto (<i>master plan</i>).	51
Figura 13 – Exemplo de tela para composição do Planejamento de Médio Prazo (<i>lookahead planning</i>).	52
Figura 14 – Exemplo de tela de Planejamento de Curto Prazo (<i>weekly work planning</i>).	53
Figura 15 – Exemplo de tela de Planejamento Individual da Tarefa.	53
Figura 16 – Exemplo de tela de registro da quantidade de trabalho realizada.	54
Figura 17 – Exemplo de tela de indicadores da Taxa de Produção.	55
Figura 18 – Exemplo de tela de Projeção de Conclusão de Tarefa.	57

Lista de abreviaturas e siglas

API	Application Programming Interface
BDS	Building Description System
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
CG-BIM	Comitê Gestor da Estratégia BIM
CIFE	Stanford University's Center for Integrated Facilities Engineering
CPM	Critical Path Method
DC	Desvio de Custo
DP	Desvio de Prazo
EMBRAPII	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
ER	Entidade-Relacionamento
ERP	Enterprise Resource Planning
EVM	Earned Value Method
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBP	Indicador de Boas Práticas
IC	Indústria da Construção
ICP	Índice de Confiabilidade do Planejamento
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IGLC	The International Group for Lean Construction
LAR	Laboratório de Redes de Computadores e Sistemas
LBS	Location-Based Scheduling
LPS	Last Planner System
NBIS	National Building Information Standard

PAIC	Pesquisa Anual da Indústria da Construção
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PDI	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PIB	Produto Interno Bruto
PPC	Porcentagem Planejada Concluída
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SOP	Superintendência de Obras Públicas do Governo do Estado do Ceará
STP	Sistema Toyota de Produção
TCU	Tribunal de Contas da União
TDIC	Tecnologias Digitais da INformação e Comunicação
TTP	Takt Time Planning
WBS	Work Breakdown Structure

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização	17
1.2	Problemática	18
1.3	Objetivos	19
1.3.1	Objetivo Geral	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	Produção Científica	20
1.5	Estrutura da Dissertação	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Metodologias de gestão de projetos da Indústria da Construção	23
2.1.1	<i>Building Information Modeling (BIM)</i>	23
2.1.2	<i>Lean Construction</i>	26
2.1.3	<i>Last Planner System (LPS)</i>	27
2.2	Funções de Singularidade	30
2.2.1	Conceitos Gerais	30
2.2.2	Utilizando Funções de Singularidade para descrever a carga	30
2.2.3	Utilizando Funções de Singularidade no contexto de LPS	32
3	TRABALHOS RELACIONADOS	37
3.1	Trabalhos da Literatura	37
3.1.1	Trabalho de (MOURA; FORMOSO, 2009)	37
3.1.2	Trabalho de (SILVA; CRIPPA; SCHEER, 2019)	38
3.1.3	Trabalho de (SHEHAB et al., 2019)	38
3.1.4	Trabalho de (LUCKO; MUKHERJEE, 2013; LUCKO; SU, 2014; HAJDU; LUCKO; SU, 2017)	39
3.2	Sistemas de gestão da Indústria da Construção	39
3.2.1	Bentham Obras	39
3.2.2	Plataforma Sienge	40
3.2.3	Sistema ERP UAU	42
4	PROPOSTA	43
4.1	Etapas 1: Entendimento do domínio de estudo	43
4.2	Etapas 2 - Análise de cronogramas físico-financeiro	44
4.3	Etapas 3 - Análise de práticas modernas de gestão em projetos da IC	45
4.4	Etapas 4 - Análise de modelos matemáticos	46

4.5	Etapa 5 - Modelagem da proposta em um sistema de gestão de construção civil	47
4.6	Etapa 6 - Implementação da proposta em um sistema de gestão de obras	48
5	PROVA DE CONCEITO	51
5.1	<i>Master plan</i>	51
5.2	<i>Lookahead planning</i>	52
5.3	<i>Weekly work planning</i>	52
5.4	Indicadores para tomada de decisão	54
6	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	61

1 Introdução

1.1 Contextualização

No Brasil, a Indústria da Construção (IC) tem uma representatividade significativa no Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Segundo a última Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2019), no ano de 2018 o setor gerou 278 bilhões de reais em valor de incorporações, obras e/ou serviços da construção. Mais especificamente, R\$ 126,6 bilhões na construção de edifícios, R\$ 87,0 bilhões em obras de infraestrutura e R\$ 64,4 bilhões em serviços especializados para construção. A pesquisa também revela que ao final de 2018 o setor englobava 124,5 mil empresas ativas, ocupando 1,9 milhão de trabalhadores. Além disso, o PAIC também apresenta que o gasto com salários, retiradas e outras remunerações totalizou R\$ 53,3 bilhões no ano.

Apesar da incontestável relevância da IC para a movimentação da economia brasileira, o setor ainda enfrenta inúmeros desafios quando as temáticas são planejamento e gerenciamento de prazos.

Em 2019, o Tribunal de Contas da União (TCU), após auditoria em mais de 38 mil contratos referentes a obras públicas paralisadas no Brasil financiadas com recursos federais, apontou que cerca de 37% das obras encontravam-se paralisadas, contabilizando mais de 14 mil obras (UNIÃO, 2019). Somente as obras paralisadas totalizavam um investimento da ordem de 144 bilhões de reais, dos quais 10 bilhões já haviam sido aplicados. Conforme apontado no próprio documento, as consequências dessas paralisações vão muito além dos recursos financeiros que são desperdiçados. Entre outros efeitos negativos, o documento destaca os serviços que deixaram de ser prestados à população em geral, os prejuízos ao crescimento econômico do país e, por fim, os empregos que não são gerados. Por exemplo, apenas no tocante aos recursos destinados às creches, 75 mil vagas deixaram de ser criadas e oferecidas à população. Por fim, destaca-se que o documento do TCU fez recomendações ao Ministério da Economia com o objetivo de aperfeiçoar os procedimentos relacionados à gestão das obras. Dentre as várias recomendações, é citada a necessidade de aprimorar os sistemas de gestão para registrar, de forma ágil e confiável a situação da obra, especialmente em relação ao ritmo de execução.

Já um relatório da Superintendência de Obras Públicas (SOP) do Governo do Estado do Ceará, disponível no Portal da Transparência, mostra que, no período de 2010 a 2022, de um total de 3114 obras, cerca de 34,17% das obras concluídas ou em execução tiveram aditivos em seus cronogramas (SOP, 2022).

Infelizmente, esses cenários de atrasos não são exceções no cenário brasileiro. Inclusive, existem diversos estudos sobre as razões dos atrasos em projetos dessa natureza e os principais motivos elencados estão associados às questões gerenciais e ao ambiente do projeto (GONZÁLEZ et al., 2014).

Diante de tal cenário, cabe a realização de estudos direcionados ao processo de planejamento e controle de obras da IC associado ao uso de Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação (TDICs) que sejam capazes de apoiar os *stakeholders* de uma obra (gestores, engenheiros, arquitetos, supervisores, técnicos, mão de obra especializada, etc) na execução do cronograma e na predição de atrasos nas atividades planejadas das obras.

1.2 Problemática

Na IC, o uso de ferramentas computacionais para auxílio na tomada de decisões é uma realidade desde a década de 1970 (LEVY, 2018), tendo como propósito de sintetizar e analisar informações. Porém, nos últimos anos, com o vasto alcance da Internet e o surgimento de conceitos como o da Indústria 5.0, o setor da IC tem utilizado amplamente os mais variados tipos de TICs não como uma opção, mas como uma exigência dos próprios projetos e do mercado, que requerem processos mais ágeis e assertivos. O uso de máquinas automatizadas, realidade aumentada, inteligência artificial, drones, *big data* e computação móvel são alguns dos vários exemplos de inovações tecnológicas aliadas da IC na atualidade. Advoga-se aqui que muitas dessas tecnologias podem ser adotadas para o desafio de planejamento dos cronogramas e predição de atrasos na IC.

Por exemplo, segundo Sears (SEARS; CLOUGH; SEARS, 2008), um gerente de um projeto na IC, sendo o responsável pela manutenção e interpretação de grandes volumes de dados numéricos, deve reagir rapidamente às mudanças e tomar suas decisões com segurança. Para tanto, de acordo com o autor, um software de gerenciamento moderno pode ser utilizado para ajudar na disponibilização de informações para a avaliação de cursos alternativos de ação.

No entanto, diversos trabalhos na literatura destacam que apenas o uso de um software especializado para o tratamento de informações e apoio à tomada de decisões pode não ser suficiente. Por exemplo, Holm (HOLM, 2019) destaca que a gestão do cronograma é fundamental para o sucesso de um projeto da IC e que a chave para um gerenciamento eficaz é planejar cuidadosamente o trabalho a ser executado, desenvolvendo um cronograma de construção realista e gerenciando o desempenho do trabalho. Também é relevante a construção de uma base de dados a partir de cronogramas já executados para que se possa identificar fatores de produtividade.

Já no trabalho (SEARS, 2008), é citado que a problemática de atraso na entrega de

obras está diretamente relacionada à gestão de execução de cronograma. Independente da metodologia ou tecnologia, o trabalho mostra que identificar os desvios em um cronograma é o recurso chave em sistemas de informação para gestão de projetos de construção. Mais especificamente, o monitoramento das atividades deve permitir a detecção antecipada de problemas, pois custo e tempo podem ficar rapidamente fora de controle.

Neste trabalho, utiliza-se o termo **Planejamento e Controle da Produção (PCP)** para referenciar o processo utilizado pela IC que auxilia no gerenciamento das diversas etapas na produção. É através do PCP que a indústria pode verificar, por exemplo: quando, quanto e onde produzir, em que ordem produzir, e principalmente confirmar se a execução está seguindo o planejamento.

É importante destacar que a proposta desta dissertação foi toda desenvolvida a partir de uma demanda de mercado oriunda de um projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) financiado pela EMBRAPII¹, tendo como demandante a empresa *Quanta Consultoria*², uma empresa com forte atuação a nível nacional e internacional que opera nas áreas de consultoria, engenharia e planejamento urbano. Apesar da demanda ser proveniente de uma empresa específica, a proposta apresentada neste trabalho pode ser aplicada/replicada por outras empresas, governos e/ou sistemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é apresentar uma proposta para melhoria do processo de Planejamento e Controle da Produção (PCP), principalmente no aspecto relacionado aos atrasos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Realizar um estudo sobre práticas modernas de gestão em projetos de construção civil.
- Realizar uma análise de documentos, ferramentas e demais soluções utilizados por empresas da IC para gestão de cronogramas físico-financeiro em seus projetos de construção.
- Definir um modelo matemático capaz de auxiliar na predição de atrasos em projetos de construção civil.

¹ Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial - <https://embrapii.org.br/>

² <https://www.quantaconsultoria.com/>

- Realizar a modelagem de uma solução computacional em um sistema real de gestão de construção civil (*Bentham Obras*).
- Incrementar os recursos da API do sistema *Bentham Obras* com base em novas entidades definidas no banco de dados reestruturado.
- Refatorar o fluxo e as telas do *front-end* para o registro e acompanhamento das atividades planejadas e priorizadas nas reuniões de planejamento orientadas a partir da *Last Planner*.
- Converter em código o algoritmo das funções de singularidade.
- Gerar painéis com indicadores e gráficos de acompanhamento do andamento individual das atividades.
- Realizar uma prova de conceito para validar a aplicação das funções de singularidade na projeção de atrasos através de uma gestão baseada em *Last Planner*.

1.4 Produção Científica

Durante o mestrado, os seguintes artigos foram publicados:

- **FREITAS, RENATO ALEXANDRE C.**; BRAGA, REINALDO B.; DE OLIVEIRA, CARINA T. **Uma Proposta para Melhoria do Planejamento e Controle da Produção em Projetos de Construção Civil**. In: Escola Regional de Computação Ceará, Maranhão, Piauí, 2021, Brasil. Anais da IX Escola Regional de Computação Ceará, Maranhão, Piauí (ERCEMAPI 2021), 2021. p. 99. (FREITAS; BRAGA; OLIVEIRA, 2021).
- OLIVEIRA, MATHEUS F. de; **FREITAS, RENATO A. C.**; EVANGELISTA, SÍLVIO R.; OLIVEIRA, Henrique V.; ARRUDA, CAIRAMIR; S. JÚNIOR, FRANCISCO; OLIVEIRA, ANTÔNIO MAURO B.. **Revive Negócio, uma plataforma para impulsionar ideias e startups no ecossistema de inovação do Ceará**. In: WORKSHOP SOBRE ASPECTOS SOCIAIS, HUMANOS E ECONÔMICOS DE SOFTWARE (WASHES), 6. , 2021, Evento Online. Anais do VI Workshop sobre Aspectos Sociais, Humanos e Econômicos de Software. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021 . p. 31-40. (OLIVEIRA et al., 2021).
- NASCIMENTO, LEONARDO; CASTRO, PAULO; OLIVEIRA, MAURO; JOSE, FABIO; COSTA, VALTER; MOURA, CESAR; **FREITAS, RENATO**; MONTEIRO, ODORICO. **PIXEL, Plataforma para Integração de Experimentos de Interoperabilidade em Sistemas Legados de Saúde Pública**. In: ESCOLA REGIONAL DE COMPUTAÇÃO CEARÁ, MARANHÃO, PIAUÍ (ERCEMAPI), 8. , 2020, Evento Online. Anais da VIII Escola Regional de Computação do Ceará, Maranhão e Piauí. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020 . p. 181-188. (NASCIMENTO et al., 2020).

- GOMES, FABIO; FREITAS, RENATO; RIBEIRO, MORGANA; MOURA, CÉSAR; ANDRADE, ODORICO, OLIVEIRA, MAURO. **GIRLS, a Gateway for Interoperability of electronic health Record in Low-cost System : Interoperability beetween FHIR and OpenEHR Standards.** In: IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (IEEE Healthcom), 2019. (GOMES et al., 2019).

1.5 Estrutura da Dissertação

O estrutura da dissertação está organizada da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que embasa esta dissertação de mestrado, dando destaque para as metodologias de gestão de projetos utilizadas na Indústria da Construção, como: *Building Information Modeling (BIM)*, *Lean Construction*, *Last Planner System*. Também destaca-se um tópico sobre Funções de Singularidade, que são utilizadas para embasar a prova de conceito; o Capítulo 3 detalha os trabalhos relacionados; o Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta; o Capítulo 5 apresenta a prova de conceito; por fim, o Capítulo 6 exhibe as considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos relevantes no contexto da Indústria da Construção (IC) e da proposta da dissertação. Na primeira seção, são apresentadas algumas metodologias de gestão de projetos da IC. Na segunda seção, são fundamentados os conceitos de funções de singularidade, que serão aplicados na proposta.

2.1 Metodologias de gestão de projetos da Indústria da Construção

2.1.1 *Building Information Modeling* (BIM)

A gestão de projetos na IC orientada através de documentos impressos, planilhas e/ou desenhos em 2D pode produzir dificuldades na interpretação e execução das atividades, bem como gerar retrabalho e falhas de projeto. O uso de desenho assistido por computador (*Computer Aided Design* - CAD) e sistemas de gestão informatizados capazes de compartilhar dados via internet têm sido uma tentativa para minimizar os problemas envolvidos em uma gestão de projetos tradicional. Entretanto, de modo geral, os sistemas de gestão informatizados não apresentam integração entre: cronogramas, modelos 3D, planilha de custos, etc. Diante disso, surge um novo desafio para os desenvolvedores de sistemas de gestão informatizados da IC, que é a adoção de um novo paradigma denominado *Building Information Modeling* (BIM) (EASTMAN, 2018).

Uma das primeiras referências a BIM foi publicada por Charles Eastman no ano de 1975 em artigo de um jornal norte-americano descrevendo um sistema denominado *Building Description System* (BDS) (EASTMAN, 2018). Nesta publicação, Eastman discorre sobre como definir elementos de forma interativa e assim permitir que mudanças sejam aplicadas em uma única vez em cortes, plantas e perspectivas a partir da mesma descrição de elementos. Porém, na época, restrições relacionadas ao custo da capacidade de computação, bem como à adoção generalizada do CAD inviabilizaram o progresso em direção ao BDS.

A modelagem de produtos de construção orientada a objetos concretizou-se na década de 1990, sendo, atualmente, denominada *Building Information Modeling* (BIM), em português *modelagem de informações da construção* (EASTMAN, 2018).

A BIM é definida pelo *National Institute of Building Sciences* (NBIS)¹ como uma representação digital das características físicas e funcionais de uma construção. Seu propósito é formar uma base confiável para a tomada de decisões durante o ciclo de vida da construção, com objetos modelados em diferentes dimensões, que representam diferentes

¹ <https://www.nibs.org>

níveis de maturidade. Inclusive, a tecnologia BIM evoluiu de dimensões básicas em 3D e 4D para dimensões mais sofisticadas em 5D, 6D e 7D.

A promessa da BIM é reduzir significativamente as horas de trabalho associadas à necessidade de extrair informações de documentos impressos e desenhos para preencher manualmente um banco de dados em um sistema informatizado, sendo isso possível graças à interoperabilidade proposta pelo modelo BIM (EASTMAN, 2018).

Assim, sob a óptica da interoperabilidade, Eastman (2018) define a BIM como uma representação digital do processo de construção usado para facilitar a troca de informações em formato digital. Eastman (2018) destaca ainda que a ideia de tal formato é permitir alterações sem produzir retrabalho e redundância, sendo possível aplicar alterações em um objeto específico sem a necessidade de atualizar as diversas visões do projeto.

Com base em um estudo realizado pelo *Stanford University's Center for Integrated Facilities Engineering* (CIFE) em 2007, Forbes (2011) destaca que, do ponto de vista econômico, os projetos que utilizam a BIM são capazes de:

- Eliminar 40% de alterações não orçadas.
- Alcançar uma precisão na estimativa de custo dentro de 3%.
- Reduzir em até 80% o tempo necessário para gerar uma estimativa de custo.
- Economizar até 10% do valor do contrato por meio de detecções de conflitos.
- Reduzir em até 7% o tempo do projeto.
- Aumentar a produtividade de campo na faixa de 20% a 30%.
- Reduzir em 10 vezes ou mais solicitações de informações e pedidos de alteração.

A BIM pode ser aplicada em todas as fases de um projeto e, de acordo com Forbes (2011), durante a fase de construção, a estimativa de custos pode ser prontamente obtida e o planejamento do trabalho pode ser integrado ao cronograma do construtor para ver o quão bem ele atende ao cronograma mestre do projeto. No mais, os detalhes do projeto arquitetônico podem ser facilmente convertidos em desenhos de construção e instruções de pré-fabricação para subconjuntos. Outro aspecto é a redução de erros cometidos na interpretação dos documentos do contrato e a interação entre vários sistemas de construção e a detecção de interferência muito antes do início da instalação ou montagem.

Para ilustrar um exemplo da interoperabilidade permitida pelos objetos BIM, a Figura 1 apresenta como os objetos modelados em BIM podem ser representados em diferentes sistemas.

A Figura 1 apresenta um sistema de ventilação selecionado na lista de atividades e “objetos” do projeto no software BIMCollab Zoom². A partir deste, é possível observar a barra na lateral esquerda com opções para navegação pelo projeto na aba “*Navigation*”,

² <https://helpcenter.bimcollab.com/portal/en/kb/articles/explore-the-example-project-in-bimcollab-zoom>

- Incentivar a concorrência no mercado por meio de padrões neutros de interoperabilidade BIM.

O CG-BIM definiu metas para a estratégia de incentivo a implantação da BIM na indústria brasileira da IC. Tais metas foram publicadas em (MDIC, 2018). Algumas metas que se destacam são:

- Aumentar a produtividade das empresas em 10% (produção por trabalhador das empresas que adotarem a BIM).
- Reduzir custos em 9,7% (custos de produção das empresas que adotarem a BIM).
- Aumentar em 10 vezes a adoção da BIM (i.e, hoje, somente 5% do Produto Interno Bruto - PIB - da Construção Civil adota a BIM).
- Elevar em 28,9% o PIB da Construção Civil (i.e., com a adoção da BIM, o PIB do setor, ao invés de se elevar 2% ao ano, deve se elevar em 2,6% entre 2018 e 2028, ou seja, terá aumentado 28,9% no período, atingindo um patamar de produção inédito).

Já o decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020, estabelece a utilização da BIM na execução direta e indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e entidades da administração pública federal, considerando a Estratégia Nacional de Disseminação do BIM estabelecida no Decreto nº 9.983/2019 (BRASIL, 2020).

2.1.2 *Lean Construction*

Baseada no Sistema Toyota de Produção (STP), a *Lean Construction* (“construção enxuta”, em português) está pautada em princípios que buscam a melhoria contínua e a redução de desperdícios (MUBARAK, 2015).

Um dos primeiros trabalhos sobre o tema foi publicado em 1992 por Koskela em (KOSKELA, 1992). Em 1993, foi constituído o *The International Group for Lean Construction* (IGLC)³, uma rede internacional de pesquisadores da prática e da academia em arquitetura, engenharia e construção que tem o propósito de disseminar a filosofia *Lean Construction*. Inclusive, desde 1996, o IGLC promove uma conferência internacional em diversas cidades do mundo para debater temáticas relevantes no contexto da *Lean Construction*. Por exemplo, no ano de 2021 foi debatida a temática da “Construção enxuta em tempos de crise: respondendo aos desafios da indústria da arquitetura, engenharia e construção pós-pandemia”⁴.

De maneira geral, pode-se dizer que a *Lean Construction* foi estruturada a partir de seguintes princípios (KOSKELA, 1992):

- Reduzir a parte que não agrega valor às atividades.

³ <https://iglc.net/>

⁴ <http://conferencia.pucp.edu.pe/iglc2021/call-for-papers/>

- Aumentar o valor de saída considerando a necessidade do cliente.
- Reduzir a variabilidade.
- Reduzir o tempo de ciclo.
- Simplificar e minimizar o número de passos, partes e ligações.
- Incrementar flexibilidade de saída.
- Incrementar processo de transparência.
- Concentrar o controle no processo completo.
- Construir melhoria contínua no processo.
- Equilibrar a melhoria do fluxo com a melhoria da conversão.
- *Benchmark*.

Considerando esses princípios na execução de uma obra e o contexto da presente dissertação, é importante citar que a adoção dos princípios do pensamento enxuto na IC concentra então em processos voltados ao acompanhamento do denominado **Planejamento e Controle da Produção** (PCP), já que atrasos são frequentes em ambientes com altos níveis de variabilidade no fluxo de trabalho, resultando em uma redução do rendimento e, consequentemente, em um aumento considerável de resíduos no processo (FORBES, 2011). De forma contrária, o que se espera na execução de uma obra é que características como rapidez e eficiência passem a fazer parte da rotina da obra.

Outra informação relevante é de que os princípios de *Lean Construction* podem ser aplicados tanto no processo geral quanto nos subprocessos de uma obra. O objetivo é resolver ou diminuir problemas como a falta de transparência, controle dos segmentos e fluxo no processo (KOSKELA, 1992).

Koskela (1992) destaca que para os princípios citados serem de fato eficazes, é necessário que eles estejam associados a um conjunto de conceitos e técnicas, tais como *just in time*, gerenciamento da qualidade total, competição baseada no tempo, engenharia simultânea, reengenharia, gerenciamento baseado no valor, gerenciamento visual, manutenção total produtiva e envolvimento dos empregados.

Segundo Koskela e Tzortzopoulos (2020), muitos métodos e ferramentas individuais do STP são genéricos e podem muito bem ser aplicados à construção. Por outro lado, existem métodos usados exclusivamente na construção enxuta, que é o caso do *Last Planner System* (LPS), apresentado na próxima seção.

2.1.3 *Last Planner System* (LPS)

Criado por Glenn Ballard e Gregory Howell em 1992, o *Last Planner System* (LPS) é baseado nos princípios de construção enxuta. O ciclo de vida de um projeto de construção exige planejamento e controle feitos por diversos atores (ex: gestores, líderes de equipe, engenheiros, etc), em momentos e lugares diferentes, incluindo o planejamento de tarefas

menores e mais simples.

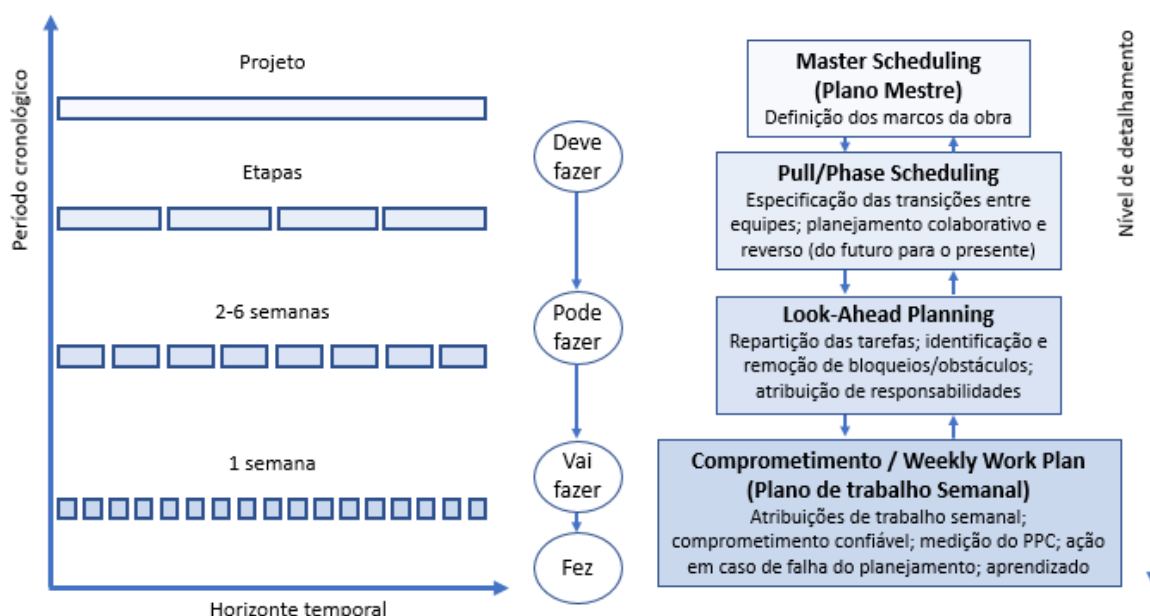
Diante de tal necessidade, a metodologia LPS surge com o propósito de reduzir as camadas hierárquicas no gerenciamento da construção e estendê-lo aos atores baseados em campo, capacitando-os no processo de gestão da construção de modo que se possa otimizar a alocação dos recursos, o planejamento semanal, os cronogramas e a execução do trabalho (BALLARD, 2000).

Em sua tese, Ballard (2000) enfatiza que o desempenho do LPS está relacionado à qualidade de sua saída, ou seja, à qualidade dos planos produzidos. As características críticas de qualidade que devem ser observadas, são:

- A tarefa está bem definida.
- A sequência de trabalho está correta.
- A quantidade certa de trabalho foi selecionada.
- O trabalho selecionado pode realmente ser feito.

Conforme ilustra a Figura 2, o LPS é organizado em níveis hierárquicos, e tem sido largamente recomendada por especialistas e instituições como a *Lean Construction Institute* (LCI)⁵.

Figura 2 – Estágios do planejamento no *Last Planner System* (LPS).



Fonte: Guia prático para implementação do LPS na construção, 2017.

Observando a Figura 2 a partir de uma leitura de cima para baixo, da direita para a esquerda, o primeiro momento do processo é caracterizado pelo **Plano Mestre** (*Master Scheduling*). Neste nível são definidos os marcos e tempo das várias fases do

⁵ <https://www.leanconstruction.org/>

projeto. Contempla toda a duração do projeto e apresenta atividades sem detalhamento, definindo-se apenas o que se “Deve fazer”.

No nível da **Programação de Fases** (*Pull/Phase Scheduling*) são especificadas as transições entre equipes e a subdivisão do projeto em etapas. A partir deste nível o planejamento torna-se colaborativo; as lideranças de cada equipe participam ativamente do planejamento. De acordo com Ballard (2007), o objetivo desta fase é a integração e coordenação das operações de vários especialistas. Esta fase é importante para a estruturação do Planejamento de Médio Prazo.

Seguindo o fluxo do nível de detalhamento ilustrado na Figura 2, a fase de **Planejamento Antecipado** (*Look-Ahead Planning*) concentra-se na repartição das tarefas; identificação e remoção de impedimentos/obstáculos; e a atribuição de responsabilidades e o que “Pode fazer”. Como é possível perceber pela figura, o horizonte das atividades neste nível varia de duas a seis semanas. O Planejamento Antecipado é o nível intermediário na hierarquia do sistema de planejamento. Ele precede o planejamento de compromisso que resulta no plano de trabalho semanal (BALLARD; HAMZEH; TOMMELEIN, 2007).

No último nível tem o **Plano de Trabalho Semanal** (*Weekly Work Plan*), que possui o mais alto nível de detalhes antes de realizar o trabalho. É feito por projetistas, supervisores de chão de fábrica, encarregados de construção e muitos outros que supervisionam imediatamente aqueles que fazem o trabalho. Neste planejamento são realizadas as atribuições de trabalho semanal; comprometimento confiável; medição do desempenho e ações que devem ser tomadas em caso de falhas do planejamento e análise do aprendizado (BALLARD; HAMZEH; TOMMELEIN, 2007). O comprometimento resulta na definição do que “Vai fazer” com base no que está sendo planejado e “Fez” do planejamento anterior.

Para a análise de desempenho realizada no planejamento semanal, o principal indicador utilizado em LPS é a Porcentagem Planejada Concluída (PPC). Este indicador é calculado a partir das tarefas completas, após a conclusão da semana (FORBES, 2011).

Quanto ao planejamento diário, Forbes (2011) menciona que projetos específicos de Engenharia, Aquisição e Construção que incluem componentes projetados sob encomenda precisam de um controle mais preciso do que o oferecido pelo plano semanal.

A implantação do LPS como referência para se planejar e controlar a produção leva à introdução de alguns conceitos e princípios inovadores na IC, como a proteção, a estabilização do trabalho, a redução da variabilidade, entre outros. Assim, o LPS objetiva, principalmente, o favorecimento da criação de um ambiente de produção confiável ao reduzir de forma significativa a variabilidade do fluxo de trabalho.

2.2 Funções de Singularidade

2.2.1 Conceitos Gerais

As funções de singularidade, também conhecidas como funções de Macaulay, são usadas na Engenharia Civil para descrever forças/cargas concentradas ou momentos agindo em uma viga ou um eixo (HIBBELER, 2018).

A representação dessas funções pode ser observada na Equação 2.1.

$$\langle x - a \rangle^n = \begin{cases} 0 & \text{para } x < a, \\ (x - a)^n & \text{para } x \geq a, \end{cases} \quad (2.1)$$

sendo x a variável em consideração (ex: localização de um ponto ao longo de uma viga), a a representação do ponto de ativação (ex: um ponto da viga onde uma carga distribuída se inicia). As funções são válidas somente para valores exponenciais $n \geq 0$.

Observa-se que um aspecto da função de singularidade é a utilização de parêntesis angulares (ex: $\langle x - a \rangle^n$), o que a diferencia de uma função comum (ex: $(x - a)^n$) escrita entre parêntesis comuns. Na Equação 2.1, quando $x \geq a$, então $\langle x - a \rangle^n = (x - a)^n$. Caso contrário, o resultado é nulo. Porém, o processo de integração dessas funções segue o mesmo das funções comuns, conforme mostra a Equação 2.2.

$$\int \langle x - a \rangle^n dx = \frac{\langle x - a \rangle^{n+1}}{n + 1} + C \quad (2.2)$$

O uso das funções de carga nesta dissertação concentra-se em representar, através de um gráfico, o momento em que a taxa de produção deve aumentar para que se cumpra o cronograma. Para tanto, é fundamental compreender como essas funções são aplicadas, como observado na Subseção 2.2.2.

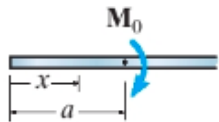
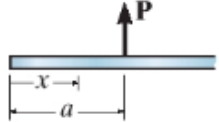
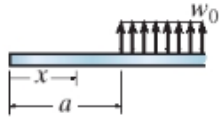
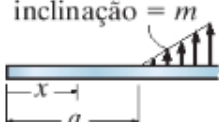
As funções de singularidade são usadas para descrever carga, momento interno e cisalhamento. Para efeito de esclarecimento, esta dissertação utiliza apenas as funções de carga como pode ser observado na Tabela 1.

2.2.2 Utilizando Funções de Singularidade para descrever a carga

Para uma melhor compreensão da aplicação das funções de singularidade, o exemplo a seguir demonstra como descrever a carga ou momento interno em uma viga.

A Figura 3 ilustra as reações de carga e momento interno com um carregamento trapezoidal negativo, bem como a reação de apoio positiva do rolete na posição A, que age para cima; também observa-se o momento que também é positivo, visto que o mesmo age em sentido horário.

Tabela 1 – Função da carga distribuída e triangular

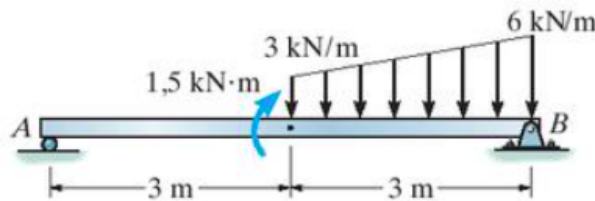
Carga	Função da carga
	$w = w(x)$ Momento $w = M_0 \langle x - a \rangle^{-2}$
	Concentrada $w = P \langle x - a \rangle^{-1}$
	Uniforme/Distribuída $w = w_0 \langle x - a \rangle^0$
	Triangular $w = m \langle x - a \rangle^1$

Fonte: (HIBBELER, 2018)

Logo, o carregamento em qualquer ponto x na viga pode ser expresso pela Equação 2.3. Portanto, de acordo com a Tabela 1, a carga trapezoidal é separada em carga triangular e uniforme, como ilustrado na Figura 4.

$$w = 2,75 \text{ kN} \langle x - 0 \rangle^{-1} + 1,5 \text{ kN} * m \langle x - 3\text{m} \rangle^{-2} - 3 \text{ kN/m} \langle x - 3\text{m} \rangle^0 - 1 \text{ kN/m}^2 \langle x - 3\text{m} \rangle^1 \quad (2.3)$$

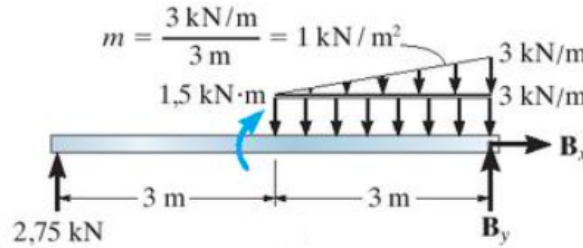
Figura 3 – Exemplo de carregamento trapezoidal



Fonte: (HIBBELER, 2018).

A seguir é possível observar a representação prática de cada função ilustrada através da Tabela 1. O primeiro termo da Equação 2.3 ($2,75 \text{ kN} \langle x - 0 \rangle^{-1}$) é um exemplo prático de força concentrada e representa a reação no ponto A gerado pelo rolete, que neste exemplo é 2,75 kN, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de carregamento triangular e uniforme



Fonte: (HIBBELER, 2018).

O próximo termo ($1,5kN * m \langle x - 3m \rangle^{-2}$) ilustra o momento interno, posicionado à três metros do ponto A, que é de 1,5 kN, com uma reação no sentido horário.

Para representar a carga uniforme temos ($3kN/m \langle x - 3m \rangle^0$), que inicia a distribuição da carga à três metros do ponto A, é importante observar que o expoente zero (0) representa cada *step*, distribuído uniformemente com uma carga de 3kN/m até o ponto B.

Por fim, também iniciada à três metros do ponto A, a carga triangular é executada com a expressão ($1kN/m^2 \langle x - 3m \rangle^1$), tendo como expoente (1) para representar a inclinação ilustrada na Figura 4.

2.2.3 Utilizando Funções de Singularidade no contexto de LPS

Ao observar como as funções de singularidade calculam a deflexão de vigas e eixos a partir da variação de cargas, identificou-se nos trabalhos de (LUCKO; MUKHERJEE, 2013; LUCKO; SU, 2014; HAJDU; LUCKO; SU, 2017; SHEHAB et al., 2019) que as funções de singularidade também são úteis para calcular e representar em um gráfico, os desvios entre o planejado e o progresso atual.

Para exemplificar essa aplicação das funções de singularidade na gestão da IC, imagina-se um caso simples no qual que se deseja realizar uma atividade que possui 4 “unidades de trabalho” e que deve ser concluída em 4 dias. Neste caso, é fácil calcular que para que a atividade seja concluída no prazo, basta que uma unidade seja realizada por dia (1 unidade/dia).

Porém, no segundo dia de trabalho (dia 2), observou-se que apenas 1 unidade foi finalizada, ao invés de 2 unidades. Em outras palavras, isso significa que a taxa de produção diária (Atual) foi de apenas 0.5 unidades/dia ao invés de 1 unidade/dia. Dado o atraso evidente, faz-se necessário entender (i) o que ocorrerá se a taxa de produção permanecer como está e, além disso, (ii) como deve ser ajustada a taxa de produção a partir do dia de observação (dia 2) para atender ao cronograma inicial (ou seja, finalizar as 4 unidades em 4 dias). Dessa forma pode-se utilizar a mesma lógica para adaptar a equação apresentada na subseção 2.2.2 para o acompanhamento do processo de execução

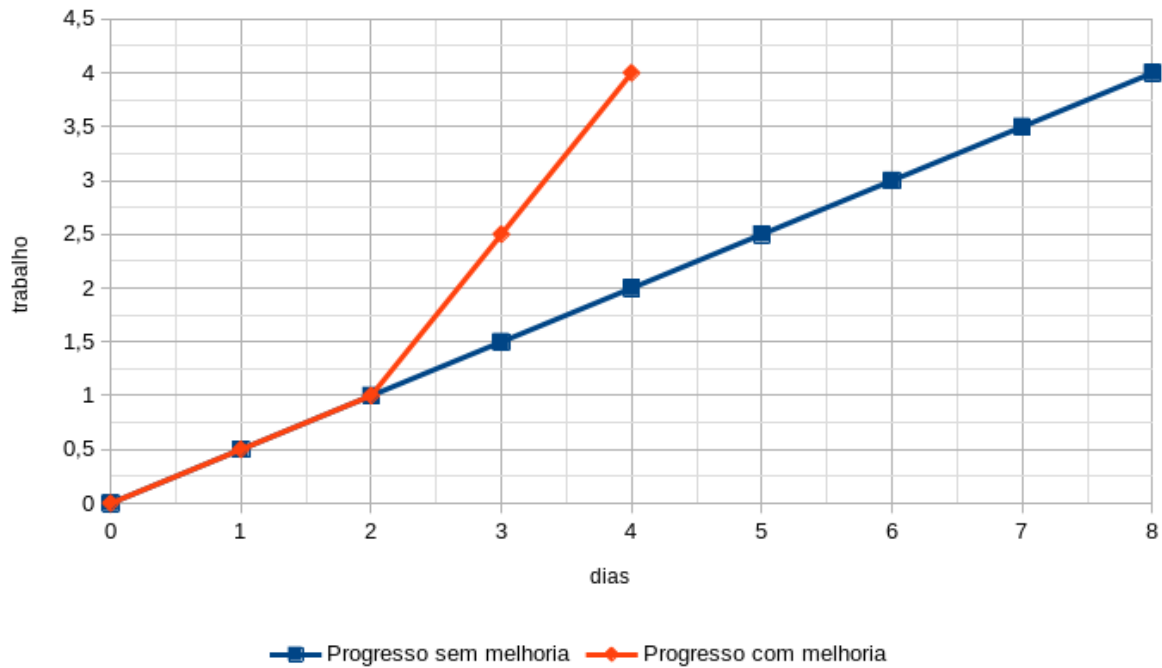
da obra. Para isso é necessário substituir força/carga por quantidade de trabalho realizado e posição em metros por dias de trabalho.

Assim, a Equação 2.4 apresenta como uma função de singularidade pode ser aplicada para expressar o que acontecerá com a atividade se nenhuma ação for tomada (Sem Melhorias).

$$w(t) = 0 \cdot \langle t - 0 \rangle^0 + 0.5 \cdot \langle t - 0 \rangle^1 - 0.5 \cdot \langle t - 8 \rangle^1 - 4 \cdot \langle t - 8 \rangle^0 \quad (2.4)$$

Ao analisar o andamento da atividade a partir do segundo dia de trabalho, observa-se que o primeiro termo da equação $0 \cdot \langle t - 0 \rangle^0$, representa o momento inicial, portanto não há nada realizado, conforme ilustrado no gráfico da Figura 5.

Figura 5 – Gráfico de acompanhamento do andamento da atividades



Fonte: Autor, 2022.

No final do segundo dia, constatou-se que a taxa de produção foi de 0,5, logo, o segundo termo da equação é atribuído $+0.5 \cdot \langle t - 0 \rangle^1$, onde o valor 0,5 representa a taxa de produção atual, a variável t o tempo (dia 2) observado e o valor 0 indica o início do trabalho. O expoente 1 indica que estamos executando uma carga triangular. Este termo será executado em loop até que se alcance o dia referente a próxima ação que neste caso é no dia (8) através do seguinte termo $-0.5 \cdot \langle t - 8 \rangle^1$.

Este termo $-0.5 \cdot \langle t - 8 \rangle^1$ indica a interrupção do *loop* da equação anterior. Em seguida, o termo $-4 \cdot \langle t - 8 \rangle^0$, é subtraído indicando o fim da execução e reposicionaria o próximo ponto na posição 0 em relação ao eixo y no gráfico. Assim, a Equação 2.4 sugere que mantendo-se a taxa de produção identificada no dia (2), a atividade poderá não se

cumprir no prazo estipulado no cronograma, como é possível observar no gráfico na Figura 5, através da linha indicando o "Progresso sem melhoria".

Já a Equação 2.5 apresenta como uma função de singularidade pode ser aplicada para mostrar como deve ser a taxa de produção para atender ao cronograma (Com Melhorias).

$$w(t) = 0 \cdot \langle t - 0 \rangle^0 + 0.5 \cdot \langle t - 0 \rangle^1 + 3/2 \cdot \langle t - 2 \rangle^1 - 3/2 \cdot \langle t - 4 \rangle^1 - 4 \cdot \langle t - 4 \rangle^0 \quad (2.5)$$

Na Equação 2.5 os dois primeiros termos estão iguais aos da Equação 2.4, sendo que a análise está sendo realizado no dia (2). Ao observar que após dois dias de trabalho apenas 1 unidade foi executada, e restam apenas dois dias para a conclusão de 3 unidades, conclui-se que a taxa de produção deve ser ajustada para que se cumpra o cronograma.

Portanto, para a execução de 3 unidades em 2 dias (3/2), a taxa de produção deve ser de 1,5 unidade/dia, conforme expresso no terceiro termo da equação $+3/2 \cdot \langle t - 2 \rangle^1$. Adotando-se os ajustes necessários para que a equipe alcance a nova taxa de produção, o *loop* será executado até que se complete a atividade no quarto dia, como ilustrado no gráfico da Figura 5, indicado pela linha de "Progresso com melhoria". Por fim, os termos seguintes $-3/2 \cdot \langle t - 4 \rangle^1 - 4 \cdot \langle t - 4 \rangle^0$, como já exemplificados anteriormente, realizam a interrupção do *loop*.

O pseudocódigo da função sem melhoria indicada na Equação 2.4 é apresentado na Figura 6. Já o pseudocódigo da função com melhoria indicada na Equação 2.5 é demonstrado na Figura 7.

Figura 6 – Pseudocódigo - Função sem melhoria

```

1  algoritmo "Gerar projeção sem melhoria"
2
3  var
4      vetorCargaSemMelhoria = [];
5      valorInicial = 0;
6      taxaAcumulada = 0;
7      taxaProducaoAtual = 0;
8      totalUnidadesPlanejadas = 0;
9      qtdDiasSemMelhoria = (totalUnidadesPlanejadas / taxaProducaoAtual);
10
11  inicio
12
13      //Primeiro termo da equação 2.5 >> 0 · (t - 0) ^0
14      vetorCargaSemMelhoria[0] = valorInicial;
15
16      para (i = 1; i <= qtdDiasSemMelhoria; i++) {
17          taxaAcumulada = taxaAcumulada + taxaProducaoAtual;
18
19          se (taxaAcumulada > totalUnidadesPlanejadas) {
20              //Segundo termo da equação >> 0.5 · (t - 0) ^1
21              vetorCargaSemMelhoria[i] = parseInt(vetorCargaSemMelhoria[i - 1] + (taxaProducaoAtual - (taxaAcumulada - totalUnidadesPlanejadas)));
22          } senão {
23              //Terceiro e quarto termo da equação >> 0.5 · (t - 8) ^1 - 4 · (t - 8) ^0
24              vetorCargaSemMelhoria[i] = parseInt(vetorCargaSemMelhoria[i - 1] + taxaProducaoAtual);
25          }
26      } fimpara
27
28  fimalgoritmo

```

Fonte: Autor, 2022.

Figura 7 – Pseudocódigo - Função com melhoria

```

1  algoritmo "Gerar projeção com melhoria"
2
3  var
4      vetorCargaComMelhoria = [];
5      valorInicialMelhoria = 0;
6      taxaMelhoriaAcumulada = 0;
7      taxaProducaoAtual = 0;
8      novaTaxaProducao = 0;
9      totalUnidadesPlanejadas = 0;
10     numeroDiasExecutados = ?;
11     qtdDiasSemMelhoria = (totalUnidadesPlanejadas / taxaProducaoAtual);
12
13 inicio
14
15 //Primeiro termo da equação 2.5 >>  $0 \cdot (t \square 0)^0$ 
16 vetorCargaSemMelhoria[0] = valorInicialMelhoria;
17
18 para (i = 1; i <= qtdDiasComMelhoria; i++) {
19     taxaAcumulada = taxaAcumulada + taxaProducaoAtual;
20
21     se (i <= numeroDiasExecutados) {
22         //Segundo termo da equação >>  $0.5 \cdot (t \square 0)^1$ 
23         vetorCargaComMelhoria[i] = parseInt(vetorCargaSemMelhoria[i - 1] + taxaProducaoAtual);
24         taxaMelhoriaAcumulada = taxaMelhoriaAcumulada + taxaProducaoAtual;
25     } senão {
26         //Terceiro e quarto termo da equação >>  $0.5 \cdot (t \square 8)^1 \square 4 \cdot (t \square 8)^0$ 
27         novaTaxaProducao = (totalUnidadesPlanejadas - taxaMelhoriaAcumulada) / (qtdDiasComMelhoria - numeroDiasExecutados);
28         vetorCargaComMelhoria[i] = parseInt(vetorCargaComMelhoria[i - 1] + novaTaxaProducao);
29     }
30 }fimpara
31
32 fimalgoritmo

```

Fonte: Autor, 2022.

3 Trabalhos Relacionados

Propor sistemas, ferramentas e soluções para melhorar o desempenho do processo de Planejamento e Controle da Produção (PCP) na Indústria da Construção (IC) é um desafio que exige uma base conceitual sólida no que se refere às melhores práticas de gestão.

Neste capítulo, dentre os trabalhos relacionados analisados e selecionados destacam-se, principalmente, aqueles com foco em análises qualitativas em projetos isolados e análise quantitativa de estratégias relacionadas a adoção de *Last Planner System* LPS. Nesse contexto, também são apresentados sistemas computacionais de gestão da IC.

3.1 Trabalhos da Literatura

3.1.1 Trabalho de (MOURA; FORMOSO, 2009)

No trabalho de (MOURA; FORMOSO, 2009) é realizado um estudo cujo objetivo foi o desenvolvimento e implantação de um sistema de indicadores para realização de *benchmarking* na IC. A partir de dados de empresas participantes do projeto, foi realizada uma análise quantitativa de indicadores de PCP para identificar os impactos positivos e negativos da adoção do LPS em empreendimentos da construção civil com ênfase no custo e no prazo. O estudo foi realizado a partir de dados reais de projetos já realizados.

A análise levou em consideração os seguintes indicadores: Percentual de Planos Concluídos (PPC); Desvio de Custo (DC), que é o resultado da relação entre o custo incorrido e o custo orçado; Desvio de Prazo (DP) que é obtido a partir da aplicação do *Earned Value Method* (EVM), através do qual é comparado o avanço físico esperado com o avanço físico real, medido em dias; e o Indicador de Boas Práticas (IBP) no canteiro que considera aspectos de qualidade no planejamento do layout e logística do canteiro, que são: instalações provisórias, segurança da obra, sistema de movimentação, armazenamento e gestão de materiais e resíduos sólidos da construção.

Os resultados apresentados, apesar de não conclusivos, fornecem uma importante contribuição ao identificar evidências de eficácia dos sistemas de PCP baseados em LPS, afetando positivamente o desempenho de empreendimentos da construção civil no que se refere a custos e prazos.

3.1.2 Trabalho de (SILVA; CRIPPA; SCHEER, 2019)

Já no estudo de (SILVA; CRIPPA; SCHEER, 2019) é destaque o uso da *Building Information Modeling* (BIM). Mais detalhadamente, o trabalho realiza uma análise para identificar e classificar os benefícios e dificuldades envolvidas na associação da BIM ao PCP. Apesar de observadas melhorias no PCP com a adoção da BIM, os autores destacam que seu processo de implementação é árduo.

Em relação ao PCP, o controle, a representação e a distribuição de informações referentes ao cronograma tendem a apresentar inconsistências, sendo que, na maioria dos casos, este é um processo manual e, principalmente, pode não ser realizado de forma apropriada.

Assim, as principais dificuldades identificadas no trabalho são: dificuldade na implementação da tecnologia, grande consumo de trabalho intensivo para implementação efetiva da tecnologia e atualização do modelo e associação com o cronograma, comunicação entre os softwares não é 100% automatizada, desconsidera tarefas como escavações, limpeza de terreno e fatores de risco externo.

Como principais benefícios constatados na pesquisa de (SILVA; CRIPPA; SCHEER, 2019), destacam-se: otimização do processo construtivo, melhoria da comunicação através da integração, redução do retrabalho, redução do tempo de obras. Porém, é importante ressaltar que os resultados apresentados são oriundos dos dados extraídos a partir de uma revisão sistemática da literatura.

3.1.3 Trabalho de (SHEHAB et al., 2019)

Na pesquisa de Shehab 2019, a proposta é construir uma ferramenta prática para auxiliar no controle da produção também considerando o uso da metodologia *Last Planner System* (LPS) e funções de singularidade. O propósito da solução é ajudar no gerenciamento da produção e introduzir ajustes durante a semana de trabalho para reduzir o impacto da variabilidade.

A proposta é oferecer uma ferramenta prática para auxiliar o aspecto de controle em LPS, *Critical Path Method* (CPM), *Takt Time Planning* (TTP) e *Location-Based Scheduling* (LBS). Além disso, visa fornecer uma abordagem proativa no controle, onde as métricas de LPS são previstas com base no progresso da execução. Segundo Shehab o experimento utiliza funções de singularidade para identificar e minimizar desvios entre o progresso planejado e o real em LPS, CPM, TTP e LBS.

Apesar dos autores destacarem o desenvolvimento de uma ferramenta para acompanhamento do andamento das atividades, na prática o trabalho apresenta simulações do uso das funções de singularidade, mas não apresentando uma implementação real em software.

3.1.4 Trabalho de (LUCKO; MUKHERJEE, 2013; LUCKO; SU, 2014; HAJDU; LUCKO; SU, 2017)

As pesquisas de Lucko são importantes porque desenvolvem inicialmente o conceito de aplicação das funções de singularidade na gestão do tempo aplicadas em cronogramas de obras. Em função disso, Lucko consegue demonstrar as vantagens do uso das funções de singularidade aplicadas na gestão de cronogramas em comparação as metodologias tradicionais. Por exemplo a pesquisa identifica que é possível prever de forma mais precisa situações de atraso em comparação do que aconteceria com as metodologias tradicionais.

Além disso, as pesquisas do autor também apontam que o uso das singularidades possui a função de aprimorar determinadas fragilidades na metodologia *Last Planner*, como por exemplo, o dimensionamento incorreto de força de trabalho por inconsistências no planejamento.

3.2 Sistemas de gestão da Indústria da Construção

3.2.1 Bentham Obras

O Bentham Obras é um sistema computacional de gestão inteligente para a construção civil (BATISTA et al., 2019). O Bentham Obras foi fomentado por meio de uma parceria com a EMBRAPII, tendo sido desenvolvido pelo Laboratório de Redes de Computadores e Sistemas (LAR)¹ do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) a partir da demanda da empresa Quanta Consultoria Ltda. O sistema possui o tipo de licença de software proprietário².

O Bentham Obras foi desenvolvido para dar suporte aos diversos processos gerenciais e administrativos de uma obra: o acompanhamento financeiro, o controle de execução e cumprimento de contratos, o acompanhamento de cronogramas, a gestão de aspectos ambientais (ex: licenças ambientais e jazidas) e acompanhamento de não conformidades. No mais, o sistema permite a geração de diversos tipos de relatórios gerenciais e de gráficos, que viabiliza uma série de visões de forma clara e intuitiva. O objetivo de todas essas funcionalidade é otimizar o processo de tomada de decisão dos múltiplos atores de uma obra da IC, tais como os engenheiros, as empresas contratadas e contratantes, os supervisores, os administradores, os técnicos, os coordenadores, etc.

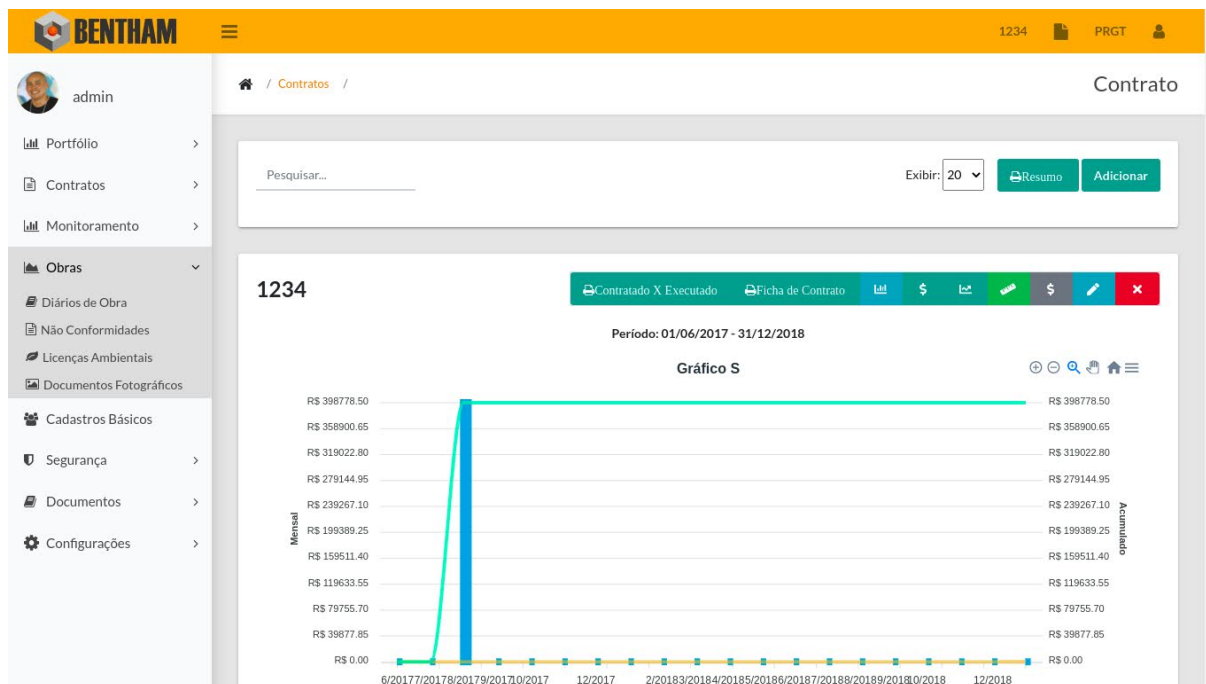
O Bentham Obras possui dois aplicativos que auxiliam na gestão da obra. O primeiro é um aplicativo web voltado para a entrada de dados como: *Work Breakdown Structure* (WBS), Gestão de contratos, Obras, Monitoramento da obra, Diários de Obra, Medições, entre outras. A Figura 8 ilustra o painel de controle de um exemplo de contrato,

¹ lar.ifce.edu.br

² INPI: BR512019000592-9

sendo possível observar um gráfico de Curva S, bem como controles para acompanhamento de tarefas e orçamento da obra. O segundo é um aplicativo móvel para utilização em campo, como, por exemplo, no canteiro de obras. A Figura 9 ilustra a tela para registro do diário de obra do aplicativo móvel. Nota-se pela figura que diversas informações referentes às condições do canteiro podem ser registradas (ex: acidentes, registro fotográfico, ocorrências, etc).

Figura 8 – Exemplo de tela do Bentham Obras web.



Fonte: Bentham Obras, 2022.

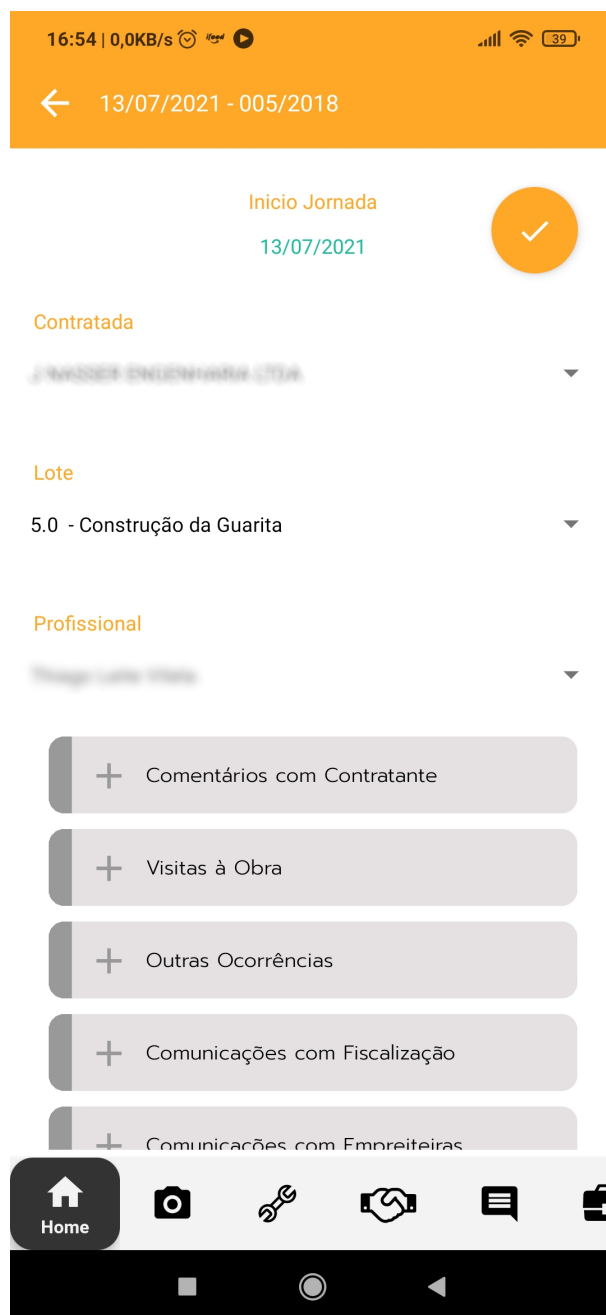
Apesar das inúmeras facilidades do Bentham Obras, inclinando-se para as tendências na indústria da construção destacou-se neste trabalho a importância de adequar o sistema à metodologias de gestão modernas (ex: *Last Planner System* e *Building Information Modelling* BIM), bem como experimentar estratégias para auxiliar na redução de atrasos nos projetos de construção.

3.2.2 Plataforma Sienge

A Sienge é uma plataforma web que opera principalmente como um *Enterprise Resource Planning* (ERP) direcionado para a indústria da construção. O núcleo da plataforma contempla diversas funcionalidades focadas em gestão, tais como:

- Controle de aquisições
- Construção e estoque
- Controle financeiro
- Vendas
- Pós-vendas

Figura 9 – Exemplo de tela do Bentham Obras móvel.



Fonte: Bentham Obras - Aplicativo Móvel, 2022.

- Crédito imobiliário
- *Compliance*

A plataforma Sienge é focada no processo de organizar o fluxo de dados, sendo estruturada para possibilitar a integração com ferramentas próprias e de terceiros. Em seu módulo de planejamento, vincula informações de custo e prazo, permite a integração com o Microsoft Project e plataformas de planejamento por “linha de balanço” ou “diagrama tempo - caminho”.

No contexto atual, um dos desafios que a plataforma tem superado é a integração

com ferramentas de modelagem BIM. A plataforma já permite obter orçamentos mais assertivos ao extrair dados quantitativos de forma automatizada, a partir de modelos BIM do software Revit.

3.2.3 Sistema ERP UAU

O sistema UAU é um ERP web para gestão do setor imobiliário e indústria da construção. Além das funcionalidades básicas de um ERP (ex: gestão de vendas, gestão de contratos, clientes e financeira), a plataforma conta com um módulo para gestão de obras.

O foco da plataforma está na gestão de orçamentos. A solução permite a confecção de orçamentos a partir de modelos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) e Base de dados com as normas para a composição de custos (SBC)³ conforme regras do Tribunal de Contas da União (TCU).

Além da adequação aos modelos exigidos pelo TCU, o módulo para gestão de orçamentos é integrado aos modelos BIM, permitindo uma maior assertividade na elaboração dos orçamentos.

³ <https://informativosbc.com.br/sobre.html>.

4 Proposta

Assim como apontado pela empresa parceira desta dissertação de mestrado (Quanta Consultoria Ltda.) e pela própria literatura (IBRAHIM et al., 2019; SHEHAB et al., 2019), há duas barreiras principais que dificultam a capacidade dos planejadores na concordância entre a carga de trabalho dos operários e sua capacidade no planejamento de curto prazo de uma obra da construção civil, que são:

- A incapacidade de prever a carga de trabalho que pode ser absorvida pelos trabalhadores de uma obra da Indústria da Construção (IC).
- A quantidade de atividades que estarão prontas com antecedência.

Conforme discutido no Capítulo 2, uma forma de superar estas barreiras consiste na adoção de processos que apoiem na melhoria do Planejamento e Controle da Produção (PCP). Neste contexto, esta dissertação contribui com a apresentação de uma proposta para melhoria do PCP na IC.

A metodologia utilizada para elaboração da proposta é apresentada em seis etapas principais, que são detalhadas na sequência desse capítulo.

Ao final, a proposta permite que gestores de obras de construção civil visualizem em um painel de controle personalizado a nível de atividade a projeção do andamento do trabalho e a possibilidade de atrasos representados através de indicadores e um gráfico. Mais especificamente, a referida solução utiliza indicadores do LPS para representar a evolução das atividades planejadas em um painel de controle personalizado para cada atividade. O painel de controle apresenta vários dados que podem auxiliar os usuários na antecipação de decisões, como: taxa de produção atual, taxa de produção esperada e taxa de produção ideal, Percentual de Plano Concluído (PPC) esperado e atual e um gráfico com a projeção de término da atividade.

4.1 Etapa 1: Entendimento do domínio de estudo

A primeira etapa da pesquisa consistiu no entendimento do domínio de estudo. Nesta etapa, foi importante o entendimento do problema e a definição dos objetivos a serem alcançados no trabalho.

Essa etapa também incluiu um análise exaustiva de documentos digitais fornecidos pela empresa parceira Quanta Consultoria Ltda. Dentre exemplos de documentos, pode-se citar:

- O Plano Contratual, um plano macro do projeto que contempla todas as ativi-

dades desde a mobilização de equipamentos e pessoal até a conclusão de uma obra, bem como suas respectivas quantidades e valores.

- O cronograma físico-financeiro, que representa a distribuição do que foi planejado e do avanço físico real em percentual e a relação com seus respectivos custos.
- O boletim de medição, um documento utilizado para verificar a compatibilidade entre o que foi executado e o que está previsto no projeto e nos quantitativos do orçamento.
- A Curva S, que também é uma representação gráfica que permite observar os desvios daquilo que foi planejado em comparação com o realizado.

O material fornecido foi utilizado para o entendimento dos processos envolvidos na gestão de uma obra e, principalmente, para nortear o desenvolvimento de um módulo em um sistema web, objeto final deste estudo.

4.2 Etapa 2 - Análise de cronogramas físico-financeiro

Complementando a definição anterior, um cronograma físico-financeiro é uma representação gráfica da evolução física de uma obra, demonstrando o que já foi executado e o respectivo valor financeiro a ser despendido, ou seja, os custos relacionados ao tempo de execução (DIAS, 2004).

As informações contidas na planilha da Figura 10 são de um cronograma físico-financeiro de projeto real de obra pública da IC executado no Brasil. Porém, o nome dos itens (Descrição Estrutura) foi ocultado para não permitir a identificação da obra.

Algumas informações do cronograma da Figura 10 servem para exemplificar problemáticas e outros pontos importantes extraídos para essa etapa. Para isso, vamos considerar um recorte do cronograma da figura para os itens planejados 3.1.1 e 3.1.2.

No primeiro item (3.1.1), 31,52% da atividade estava prevista para o mês de agosto de 2017, com um custo total de R\$ 125.703,36; porém, o total realizado medido foi de R\$ 8.996,88, o que representa apenas 2,26% do que foi planejado. Ainda observando o primeiro item da planilha, nos meses seguintes, nada foi executado.

No segundo item da planilha (3.1.2) estava previsto para iniciar no mês de setembro com o percentual de 20,21%. Porém, nota-se que em agosto de 2017 a empresa já havia realizado 18,17%, o que não estava no planejamento, com um custo total de R\$ 351.288,00 somente em agosto. Além disso, somando, por exemplo, os percentuais planejados referentes aos meses de setembro a outubro de 2017, observa-se que 53,9% do item foi planejado para este período com um custo total de R\$ 1.041.832,46. Porém, somando-se os percentuais do que foi realizado nos três meses analisados, observa-se a execução foi de apenas 32,38% com um custo realizado de R\$ 625.992,54.

Figura 10 – Exemplo de parte de um cronograma físico-financeiro de uma obra real da IC.

ITEM	DESCRIÇÃO ESTRUTURA	STATUS	2017					2018			
			ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr
3.1.1		PREVISTO R\$	31,52%	27,34%	21,65%	11,63%	7,86%				
			125.703,36	109.035,12	86.325,69	46.369,25	31.345,08				
		REALIZADO R\$	2,26%								
3.1.2		PREVISTO R\$		20,22%	33,69%	14,92%	14,40%	9,69%	7,09%		
				390.665,88	651.166,58	288.326,36	278.365,64	187.369,58	136.964,62		
		REALIZADO R\$	18,17%	13,44%	0,77%		15,93%			34,97%	
3.1.3		PREVISTO R\$			24,10%	33,98%	22,35%	11,19%	8,38%		
					485.369,25	684.326,69	450.259,64	225.369,87	168.868,06		
		REALIZADO R\$			3,05%	0,56%					
3.1.4		PREVISTO R\$				25,35%	27,62%	20,22%	17,35%	9,46%	
						874.659,69	953.256,33	697.852,36	598.741,36	326.402,33	
		REALIZADO R\$							7,45%	4,46%	
3.1.5		PREVISTO R\$						34,01%	41,04%	24,95%	
								1.408.773,77	1.700.283,14	1.033.731,97	
		REALIZADO R\$				0,96%	4,87%	9,96%		11,21%	
						39.634,64	201.620,28	412.620,65		464.595,54	

Fonte: Planilhas fornecidas pela empresa Quanta Consultoria, 2022.

Apesar de sua importância, constatamos que guiar-se apenas pelo cronograma físico-financeiro pode não garantir o PCP e, principalmente, evitar a problemática causada pelos atrasos. Em particular, com base nas observações pontuadas, talvez não seja possível garantir um comprometimento no que diz respeito ao planejado e executado. Evidenciou-se que existem desvios entre os pacotes de trabalho planejados e realizados. Concluiu-se que se fazia necessário implementar uma solução complementar que aproximasse os valores medidos dos planejados no cronograma físico-financeiro.

A partir do que foi discutido na Etapa 1, surgiram os seguintes questionamentos principais a serem respondidos nas próximas etapas:

- “Qual metodologia seria capaz de aprimorar os resultados apresentados em um cronograma físico-financeiro?”.
- “Como um sistema web poderia ser utilizado para permitir o acompanhamento da execução da obra pelos gestores?”.

4.3 Etapa 3 - Análise de práticas modernas de gestão em projetos da IC

Na Etapa 3, realizou-se um levantamento bibliográfico exaustivo de práticas modernas de gestão em projetos de construção. Algumas das soluções estudadas foram apresentadas no capítulo de Fundamentação Teórica (Capítulo 2). Nesse contexto, percebeu-se a ampla adoção da filosofia da construção enxuta (Seção 2.1.2) e do LPS (Seção 2.1.3).

No entanto, apesar das melhorias oportunizadas pela LPS, constatou-se que o uso inadequado das técnicas de planejamento e controle recomendadas poderiam apresentar desvios e produzir métricas e indicadores de desempenho com resultados contrários à realidade. De acordo com (BALLARD, 2000), o PPC apresenta algumas limitações, por

exemplo: é possível aumentar artificialmente este indicador através do estabelecimento de metas semanais inferiores à capacidade de produção das equipes, ou dividir uma tarefa em pequenos pacotes de trabalho. Isso pode resultar em um PPC com valor maior em comparação aos pacotes de trabalho bem definidos.

Com base nos princípios de definição de LPS, destacaram-se as seguintes hipóteses:

- Mesmo não sendo necessário o uso de software para a adoção de LPS, uma ferramenta web pode auxiliar na distribuição de informações com todos os *stakeholders* em tempo hábil.
- Métodos matemáticos podem potencializar a LPS através de projeções do *weekly work planning*.
- É possível formar uma base de conhecimento a partir dos indicadores de LPS e tornar os sistemas de gestão da IC mais eficientes.

4.4 Etapa 4 - Análise de modelos matemáticos

De acordo com (KOUTROMANOS, 2018), em todas as disciplinas da engenharia o foco é determinar qual será a reação quando um sistema físico (por exemplo, um prédio, uma ponte, um veículo, um organismo vivo, etc) é submetido aos efeitos do meio ambiente, acrescentando que qualquer processo físico pode ser descrito matematicamente. A partir desta constatação, levantou-se a hipótese de que equações matemáticas poderiam ser utilizadas na projeção do tempo de execução das tarefas para solucionar problemas existentes na LPS.

Mais especificamente, se é possível prever como um sistema físico reage a fatores externos, é provável que equações matemáticas possam projetar o tempo que uma atividade levará observando-se alguns indicadores, como, por exemplo, a taxa de produção real de uma equipe de campo. O desafio em propor uma solução para calcular e representar projeções de atrasos em atividades, em um ambiente onde nem sempre há computadores disponíveis, ou até mesmo rede internet, justificam a necessidade de buscar equações capazes de calcular indicadores que apontem possíveis atrasos nas atividades diárias da obra.

Outro desafio que cabe ressaltar está relacionado ao próprio LPS, visto que o PPC é calculado apenas quando as tarefas estão completas e no final da semana.

Assim, na Etapa 4 da metodologia, a pesquisa bibliográfica foi direcionada com base na hipótese apresentada na etapa anterior, que propõe a possibilidade do uso de modelos matemáticos para antecipar o PPC através de projeções antes do término do *weekly work planning*.

A pesquisa realizada apontou para a viabilidade do uso de Funções de Singularidade

na predição de atrasos em pacotes de trabalhos gerenciados através da LPS (SHEHAB et al., 2019; HIBBELER, 2018). Mais especificamente, para esta proposta, buscou-se identificar, a partir da taxa de produção, variações no tempo de execução dos pacotes de trabalho que possam resultar em atrasos.

4.5 Etapa 5 - Modelagem da proposta em um sistema de gestão de construção civil

A Etapa 5 consistiu na modelagem dos conceitos e decisões descritos nas etapas anteriores para posterior prova de conceito em um sistema real de gestão de construção civil.

O sistema escolhido para prova de conceito foi o Bentham Obras (BATISTA et al., 2019). Conforme detalhado na Seção 3.2.1, o sistema Bentham Obras dá suporte a diversos processos administrativos e gerenciais (ex: acompanhamento financeiro, controle de execução e cumprimento de contratos, acompanhamento de cronogramas, gestão de aspectos ambientais, acompanhamento de não conformidades etc). Entretanto, apesar do alto grau de inovação tecnológica do Bentham Obras, antes deste trabalho, o sistema não disponibilizava funcionalidades para o nível de PCP, conceito que vem sendo discutido desde o início desse trabalho.

Assim, durante a Etapa 5, realizou-se um estudo aprofundado das tecnologias, arquitetura e do banco de dados do Bentham Obras. De modo geral, os seguintes aspectos foram realizados para a fase de modelagem:

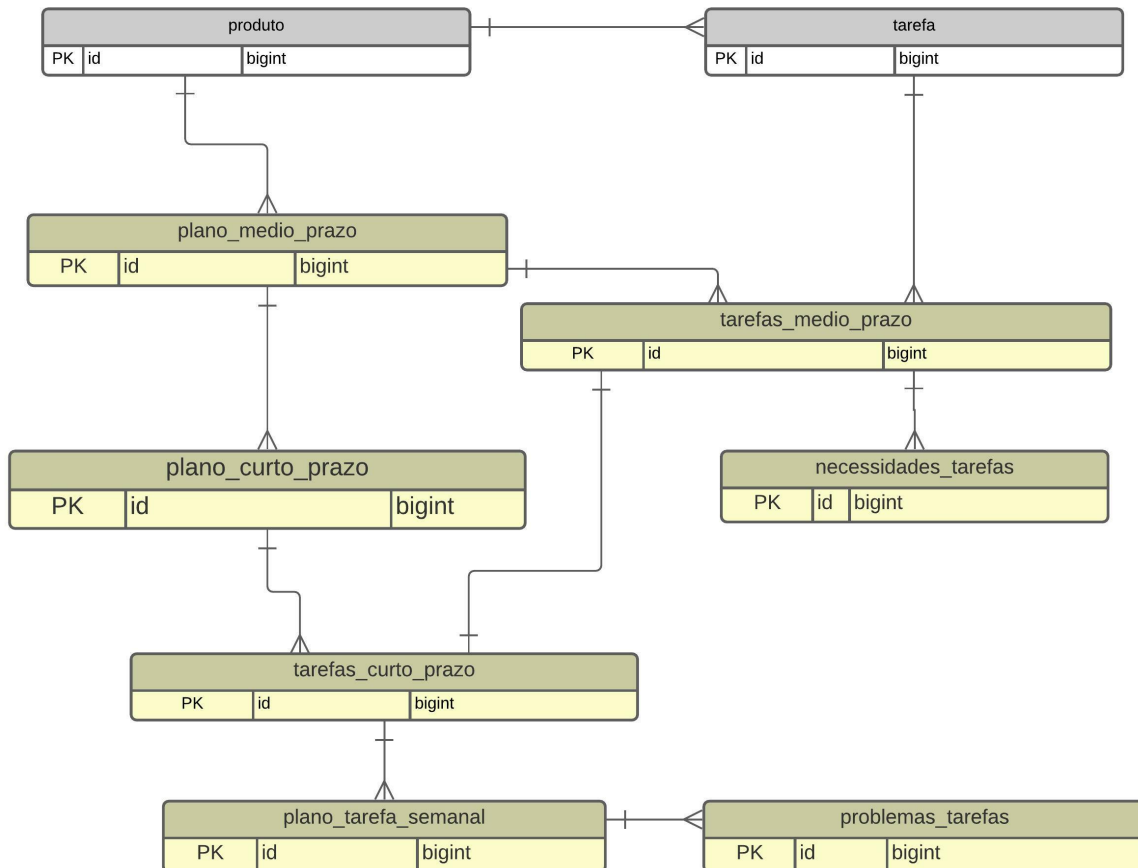
- A entidade que antes controlava e concentrava todas as atividades de uma obra tornou-se responsável pelo *master plan*;
- A hierarquia é complementada com a estrutura da *look ahead planning*, responsável pela documentação das atividades, equipes e suas respectivas necessidades.
- Foi definida a estrutura para a *weekly work planning*. Neste nível, as atividades priorizadas e sem impedimentos são documentadas.

A modelagem realizada nesta etapa foi utilizada para a fase de implementação apresentada na Etapa 6. A modelagem final foi validada pela empresa parceira.

A Figura 11 apresenta um modelo conceitual do banco de dados do sistema após a inclusão das contribuições desse trabalho. Na Figura 11, o planejamento das tarefas que antes estava concentrado apenas na entidade “tarefa”, passou por uma distribuição hierárquica com a inclusão de novas entidades para representar um ambiente gerenciado sob as práticas da LPS. Observando o diagrama Entidade-Relacionamento (ER) da Figura 11 de cima para baixo, tem-se: **produto** e **tarefa** (representa um “subprojeto” da obra e que em LPS é denominado como Plano Mestre), **plano_medio_prazo**, **tarefas_medio_prazo** e

`necessidades_tarefas` (representam as tarefas seleccionadas para o plano de médio prazo ou *Look-Ahead*), `plano_curto_prazo`, `tarefas_curto_prazo`, `plano_tarefa_semanal` e `problemas_tarefas` (representam o plano de trabalho semanal).

Figura 11 – Modelo Conceitual do Banco de Dados após a inclusão das novas entidades.



Fonte: Autor, 2022.

4.6 Etapa 6 - Implementação da proposta em um sistema de gestão de obras

Nesta etapa, a implementação da proposta consistiu em desenvolver e disponibilizar um módulo dentro do sistema Bentham Obras para gestão de PCP em projetos de construção, permitindo calcular um conjunto de indicadores de desempenho na execução das atividades semanais, para serem disponibilizados em um painel de controle.

Como dito na Etapa 4, as funções de singularidade são utilizadas nesta proposta para a projecção de cenários que representam o andamento das atividades durante a semana. Tal abordagem pode auxiliar os gestores e envolvidos no projeto a identificarem antecipadamente desvios no cronograma semanal de cada tarefa, habilitando-os a tomarem

decisões assertivas, de maneira que os atrasos possam ser evitados e, principalmente, analisar a confiabilidade do planejamento.

No sistema, o *Look-Ahead Planning* permite selecionar as atividades do *master plan*, documentar as necessidades de cada pacote de trabalho, bem como a equipe responsável. Após o planejamento, o usuário responsável replica o plano semanal na tela *weekly work planning*, indicando o comprometimento de cada equipe. Este recurso serve principalmente para comunicar aos gestores o andamento das atividades semanais. Diariamente, registra-se as medições referentes às atividades executadas e se foram completadas ou não. Com este registro é possível calcular:

- Taxa de Produção Esperada: quantidade de trabalho planejada dividida pelo número de dias planejados.
- Taxa de Produção Atual: quantidade de trabalho realizado dividido pela número de dias que já se passaram.
- Taxa de Produção Ideal: taxa de produção esperada para que o trabalho finalize dentro do tempo planejado.
- PPC esperado: número de unidades que deveriam ter sido concluídas dividido pelo número de unidades planejadas.
- PPC atual: porcentagem do PPC efetivamente executado.

De acordo com (BALLARD, 2000; GONZALEZ; ALARCON; MUNDACA, 2008; SAMAD; HAMZEH; EMDANAT, 2017; SHEHAB et al., 2019), estas métricas são importantes para analisar o desempenho do planejamento em *Last Planner System*, observando-se que guiar-se apenas pelo PPC não é suficiente.

A partir dos cenários projetados pelas funções de singularidade e o fluxo de trabalho do LPS, o sistema é capaz de produzir e classificar dados para auxiliar no planejamento de atividades futuras.

Nesta etapa, os recursos referentes ao *lookahead planning* e *weekly work planning* foram implementados e integrados a *Application Programming Interface* (API) do sistema Bentham Obras.

No próximo capítulo é detalhado uma prova de conceito com dados reais aplicando a metodologia proposta.

5 Prova de Conceito

Neste capítulo, uma prova de conceito é apresentado para demonstrar a viabilidade e os benefícios da aplicação da proposta detalhada no Capítulo 4 em um projeto real de construção civil.

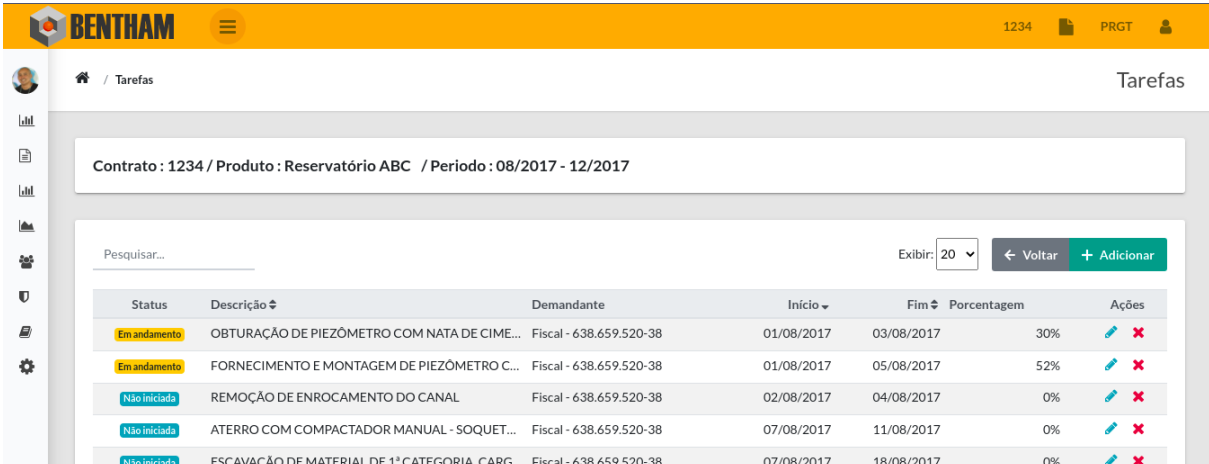
A prova de conceito utiliza o cenário de construção de um reservatório de água, identificado neste estudo como “Reservatório ABC”. É importante ressaltar que os dados utilizados pertencem a um projeto de construção pública e, para evitar a identificação do projeto, alguns itens foram descaracterizados nas telas apresentadas a seguir.

5.1 *Master plan*

A Figura 12 ilustra a tela para visualização do *master plan* do projeto em questão. Na nomenclatura do sistema Bentham Obras, o recurso disponível para controle de tarefas é denominado “Produto”, que é a representação de uma parte em um contrato de construção. Portanto, nesta prova de conceito, deve-se considerar um “Produto” como o *master plan* da LPS.

Na Figura 12, é possível observar as tarefas planejadas para a construção do “Reservatório ABC”, com uma previsão de execução no período de agosto à dezembro de 2017. A tela contempla todas as tarefas do projeto, sem detalhamento, representando o que se “Deve fazer” como mencionado na Subseção 2.1.3.

Figura 12 – Exemplo de tela de um Produto (*master plan*).



Status	Descrição	Demandante	Início	Fim	Porcentagem	Ações
Em andamento	OBTURAÇÃO DE PIEZÔMETRO COM NATA DE CIME...	Fiscal - 638.659.520-38	01/08/2017	03/08/2017	30%	
Em andamento	FORNECIMENTO E MONTAGEM DE PIEZÔMETRO C...	Fiscal - 638.659.520-38	01/08/2017	05/08/2017	52%	
Não iniciada	REMOÇÃO DE ENROCAMENTO DO CANAL	Fiscal - 638.659.520-38	02/08/2017	04/08/2017	0%	
Não iniciada	ATERRO COM COMPACTADOR MANUAL - SOQUET...	Fiscal - 638.659.520-38	07/08/2017	11/08/2017	0%	
Não iniciada	ESCAVAÇÃO DE MATERIAL DE 1ª CATEGORIA, CARG...	Fiscal - 638.659.520-38	07/08/2017	18/08/2017	0%	

Fonte: Sistema Bentham, 2022.

Neste ponto, é importante deixar claro que essa funcionalidade/tela de *master plan* já existia no sistema, mas que foi a partir dela que as novas funcionalidades referentes ao

presente trabalho foram implementadas, também é possível verificar o modelo conceitual na Seção 4.6.

5.2 Lookahead planning

A partir de um *master plan*, as tarefas podem ser selecionadas para compor o *lookahead planning* (Figura 13), conforme definido na LPS. No sistema, o *lookahead planning* recebe a nomenclatura de Planejamento de Médio Prazo. Porém, é importante observar que antes de selecionar as tarefas que irão compor o planejamento de médio prazo, as equipes participam da *Pull/Phase Scheduling*, ou Programação de Fases para especificar as transições entre equipes e a subdivisão do projeto em etapas.

A Figura 13 ilustra um exemplo da tela implementada para composição do *lookahead planning*. Após a definição da transição entre as equipes e identificação das etapas do projeto, as tarefas serão selecionadas para compor o plano de médio prazo, conforme definido na LPS. As tarefas são agrupadas em pacotes que variam de duas a seis semanas e configuram o cenário do que “Pode fazer”, como mencionado na Seção 4.6.

Figura 13 – Exemplo de tela para composição do Planejamento de Médio Prazo (*lookahead planning*).

Descrição	Status	Data Início	Data Fim	
FORNECIMENTO E MONTAGEM DE PIEZÔMETRO CASA GRANDE	Em Andamento	01/08/2017	05/08/2017	
OBTURAÇÃO DE PIEZÔMETRO COM NATA DE CIMENTO	Em Andamento	01/08/2017	03/08/2017	
REMOÇÃO DE ENROCAMENTO DO CANAL	Não Iniciado	02/08/2017	04/08/2017	
ESPALHAMENTO DE MATERIAL DE 3ª CATEGORIA EM BOTA FORA	Não Iniciado	07/08/2017	11/08/2017	
ESCAVAÇÃO DE MATERIAL DE 1ª CATEGORIA, CARGA E TRANSPORTE A...	Não Iniciado	07/08/2017	18/08/2017	

Fonte: Sistema Bentham, 2022.

5.3 Weekly work planning

Seguindo para o próximo nível da LPS, as tarefas agrupadas no *lookahead planning*, passam por um novo agrupamento para a composição do *weekly work planning*. No sistema Bentham Obras a funcionalidade é denominada Planejamento de Curto Prazo. São selecionadas as tarefas em que as equipes podem se comprometer para uma semana de trabalho, e principalmente que não existam impedimentos, como já mencionado na Seção

4.6. Na Figura 14, apresenta-se um plano semanal referente a semana número “um”, do plano de médio prazo, referente ao oitavo mês do projeto “Reservatório ABC”. Na lista de tarefas observa-se que são definidas as tarefas, equipes responsáveis, data de início e fim.

Figura 14 – Exemplo de tela de Planejamento de Curto Prazo (*weekly work planning*).

Planejamento Curto Prazo

Produto: Reservatório ABC | Plano Médio Prazo: 8 | Semana: 1

Tarefas

Adicionar tarefas

Descrição	Equipe	Data Início	Data Fim	
FORNECIMENTO E MONTAGEM DE PIEZÔMETRO CASA GRANDE	Equipe A	01/08/2017	05/08/2017	
OBTURAÇÃO DE PIEZÔMETRO COM NATA DE CIMENTO	Equipe B	01/08/2017	03/08/2017	
REMOÇÃO DE ENROCAMENTO DO CANAL	Equipe C	02/08/2017	04/08/2017	
ATERRO COM COMPACTADOR MANUAL - SOQUETE VIBRATÓRIO		07/08/2017	11/08/2017	

Fonte: Sistema Bentham, 2022.

Então, a partir da tela da Figura 14, o usuário pode acionar o botão com “ícone de calendário” e realizar o Planejamento Individual da Tarefa, conforme ilustrado na Figura 15, nesta mesma tela é exibido o painel com indicadores da tarefa selecionada conforme ilustrado na Figura 17. No exemplo em questão, observa-se que a tarefa intitulada *Fornecimento e Montagem de Piezômetro Casa Grande* foi selecionada na Figura 14 para registro individual de seu planejamento.

Figura 15 – Exemplo de tela de Planejamento Individual da Tarefa.

Planejamento Curto Prazo

Plano Semanal

Descrição: FORNECIMENTO E MONTAGEM DE PIEZÔMETRO CASA GRANDE
Data de Início: 01/08/2017 Data de Fim: 05/08/2017
Equipe: Equipe A

Pesquisar... Exibir: 20 Adicionar

Semana ^	Data Planejada ^	Unidades ^	Data Executada ^	Unid. Executadas ^	Dia finalizado ^	Ações
1	01/08/2017	250	01/08/2017	180	Sim	
1	02/08/2017	250	02/08/2017	150	Sim	
1	03/08/2017	320	03/08/2017	300	Sim	
1	04/08/2017	150		0	Não	
1	05/08/2017	250		0	Não	

Fonte: Sistema Bentham, 2022.

Todas as tarefas planejadas para o período de uma semana, passam por um planejamento individual, ou seja, é definido para cada tarefa quanto de trabalho será realizado e como será a sua distribuição ao longo da semana.

Na Figura 15, o termo “Unidades” é uma notação genérica referente a quantidade de trabalho planejado (coluna *Unidades*) e executado (Coluna *Unid. Executadas*). Assim, é possível registrar o que foi concluído ao final de cada dia de trabalho.

No exemplo da Figura 15, a tarefa selecionada totaliza 1220 unidades planejadas para execução em cinco dias. Ao final de cada dia, registra-se a quantidade de unidades concluídas e finaliza-se o dia de trabalho definindo o controle "Dia finalizado" para a opção "Sim", como pode ser observado no exemplo da Figura 16.

Figura 16 – Exemplo de tela de registro da quantidade de trabalho realizada.

Fonte: Sistema Bentham, 2022.

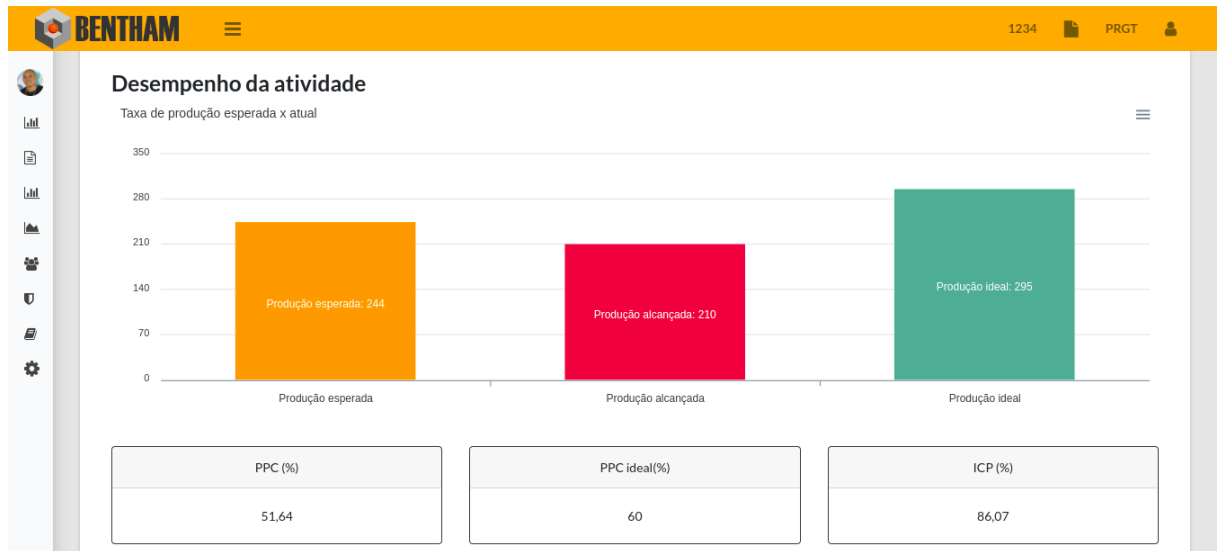
5.4 Indicadores para tomada de decisão

A partir dos registros incluídos no Planejamento Individual da Tarefa (Figura 15), a solução implementada calcula e disponibiliza um primeiro conjunto de indicadores. Esses indicadores são importantes para a tomada de decisão de gestores de uma obra de construção civil.

Na Figura 17, o painel de controle individual da tarefa, que está localizado na mesma tela de Planejamento Individual da Tarefa na Figura 15, ilustra o desempenho da atividade, com os seguintes indicadores: taxa de produção esperada, taxa de produção atual, taxa de produção ideal (quando a produção estiver abaixo do esperado), PPC esperado

(porcentagem de trabalho esperado), PPC atual (porcentagem de trabalho concluído) e ICP (Índice de confiabilidade do planejamento).

Figura 17 – Exemplo de tela de indicadores da Taxa de Produção.



Fonte: Sistema Bentham, 2022.

A taxa de produção esperada é utilizada para indicar quanto de trabalho deve ser realizado para que seja possível alcançar o prazo planejado. Conforme mostra a Equação 5.1, a taxa de produção esperada é calculada através da razão entre o total de unidades planejadas (1220 unidades) e o número de dias comprometidos (5 dias) para a execução da tarefa. Por isso, a taxa de produção esperada é de 244 unidades/dia no exemplo da Figura 17.

$$TxProdEsperada = \frac{Unidades}{DiasPlanej} = \frac{1220}{5} = 244 \quad (5.1)$$

Já a taxa de produção atual, como mostra a Equação 5.2, é calculada pela quantidade total de unidades executadas (630 unidades) pelo número de dias (3 dias), o que resulta em uma taxa de produção de 210 unidades/dia. No exemplo em questão, a taxa de produção atual está abaixo da esperada, que é de 244 unidades/dia (Equação 5.1).

$$TxProdAtual = \frac{UnidadesExec}{DiasExec} = \frac{630}{3} = 210 \quad (5.2)$$

Por este motivo o sistema exibirá um novo valor no gráfico representando a taxa de produção ideal para que se alcance o planejado. A taxa de produção ideal é calculada pela Equação 5.3. Nota-se que no numerador a equação considera as unidades que ficaram pendentes referentes aos três primeiros dias, e o denominador os dias que faltam até a conclusão da tarefa.

$$TxProdIdeal = \frac{Unidades - UnidadesExec}{DiasPlanej - DiasExec} = \frac{1220 - 630}{5 - 3} = \frac{590}{2} = 295 \quad (5.3)$$

O Percentual de Plano Concluído (PPC) é outro importante indicador de desempenho em destaque na Figura 17. Ele é calculado na proposta para indicar o percentual de conclusão da tarefa, conforme previsto na LPS.

Neste caso, como mostra a Equação 5.4, o PPC esperado representa qual deveria ser o percentual de conclusão da tarefa em uma situação em que o andamento seguisse o planejamento sem nenhum tipo de interrupção e com todas as unidades planejadas para cada dia totalmente executadas. O cálculo considera a possibilidade de ter todas as unidades planejadas até o terceiro dia da semana (3×244) dividido pelo número total de unidades planejadas para toda a semana (1220). O resultado é multiplicado por 100 para que o PPC seja apresentado em porcentagem. Por isso, o PPC esperado é de 60%.

$$PPCEsperado = \frac{DiasExec * TxProdEsperada}{Unidades} * 100 = \frac{3 * 244}{1220} * 100 = 60\% \quad (5.4)$$

Ainda em relação PPC, também é ilustrado na figura o PPC atual. A Equação 5.5 mostra o PPC atual sendo calculado pela quantidade total de unidades já executadas nos três dias considerados (630 unidades) dividida pela quantidade total de unidades planejadas (1220 unidades). Assim, o PPC esperado do exemplo é 51,64%.

$$PPCAtual = \frac{DiasExec * TxProdAtual}{Unidades} * 100 = \frac{3 * 210}{1220} * 100 = 51,64\% \quad (5.5)$$

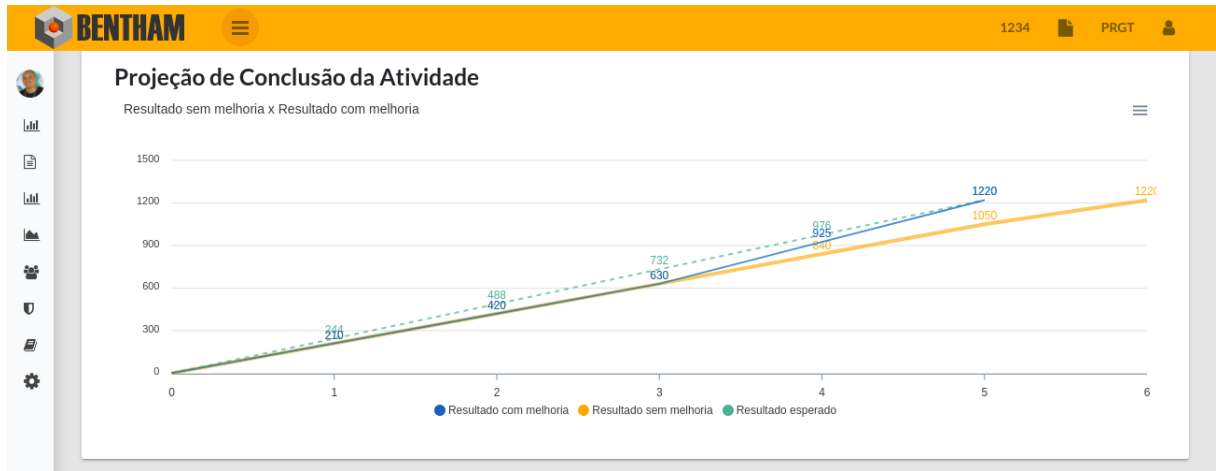
Um outro indicador apresentado na proposta é o Índice de Confiabilidade do Planejamento (ICP), como é mostrado na Equação 5.6. Ele compara o progresso real da atividade com o progresso planejado (GONZALEZ; ALARCON; MUNDACA, 2008). É medido no nível de atividade e segundo (SAMAD; HAMZEH; EMDANAT, 2017) funciona melhor na quantificação da referida confiabilidade do que o PPC.

$$ICP = (TxProdAtual/TxProdEsperada) * 100 = 210/244 * 100 = 86,07\% \quad (5.6)$$

Por fim, o gráfico apresentado na Figura 18 com o título “Projeção de Conclusão da Atividade” ilustra o momento em que a atividade provavelmente será concluída (com atraso) caso nenhuma medida seja tomada para melhorar o andamento da tarefa. No gráfico, a curva é denominada *Resultado sem melhoria*. Contudo, a partir dos indicadores (ex. taxa de produção atual, taxa de produção esperada, taxa de produção ideal, número de dias que se passaram), aplica-se o algoritmo que representa as funções de singularidade (Etapa 4 da proposta, Seção 4.4) no contexto dos registros do Planejamento Individual da Tarefa. Assim, também é possível observar no gráfico o provável término dentro do prazo a partir de medidas que possam ser adotadas para a melhoria no andamento da produção. No gráfico, a curva é denominada *Resultado com melhoria*.

Mais especificamente, os valores calculados para a projeção no gráfico foram alcançados a partir da Equação 5.7. O resultado é um vetor com os seguintes elementos

Figura 18 – Exemplo de tela de Projeção de Conclusão de Tarefa.



Fonte: Sistema Bentham, 2022.

$[0, 210, 420, 630, 840, 1050, 1220]$ para a composição da curva "Resultado sem melhoria", caso a taxa de produção se mantenha a mesma (210 unidades/dia, conforme Equação 5.2) até o fim da semana, resultando, assim, em um dia de atraso.

$$W(t) = 0 \cdot \langle t - 0 \rangle^0 + 210 \cdot \langle t - 0 \rangle^1 - 210 \cdot \langle t - 5 \rangle^1 - 1220 \cdot \langle t - 5 \rangle^0 \quad (5.7)$$

Para representar o ajuste na equação, os valores calculados para a projeção no gráfico, foram alcançados a partir da Equação 5.8, logo o resultado é um vetor com os seguintes elementos $[0, 210, 420, 630, 925, 1220]$ para a composição da curva "Resultado com melhoria".

$$W(t) = 0 \cdot \langle t - 0 \rangle^0 + 210 \cdot \langle t - 0 \rangle^1 + 295 \cdot \langle t - 3 \rangle^1 - 295 \cdot \langle t - 5 \rangle^1 - 1220 \cdot \langle t - 5 \rangle^0 \quad (5.8)$$

A projeção representada no gráfico ilustrado na Figura 18 também contempla uma terceira curva, denominada "Resultado esperado". Nesta curva os valores calculados para a projeção no gráfico, foram alcançados a partir da Equação 5.9, considerando a taxa de produção esperada conforme Equação 5.4. logo o resultado é um vetor com os seguintes elementos $[0, 244, 488, 732, 976, 1220]$ para a composição da curva "Resultado com melhoria".

$$W(t) = 0 \cdot \langle t - 0 \rangle^0 + 244 \cdot \langle t - 0 \rangle^1 - 244 \cdot \langle t - 5 \rangle^1 - 1220 \cdot \langle t - 5 \rangle^0 \quad (5.9)$$

6 Conclusões

A dissertação apresentou uma proposta que serve para ajudar no Planejamento e Controle da Produção (PCP), considerando principalmente o aspecto relacionado aos atrasos no cronograma. A proposta foi integrada a um sistema de gestão de construção civil, onde a prova de conceito demonstrou a viabilidade da adoção de metodologias de construção enxuta, aliadas a funções matemáticas já conhecidas e utilizadas pelos profissionais da IC. Essas metodologias podem auxiliar na "predição" de atrasos e principalmente desenvolver uma cultura ágil na elaboração dos planejamentos.

A adoção de funções de singularidade para projetar possíveis atrasos a nível de atividade, tem o propósito de gerar conhecimento para os profissionais envolvidos no planejamento e execução da obra. Os indicadores são produzidos durante o registro do andamento das atividades, não exigindo, com isso, modelagem e treino de bases de dados com o uso de Inteligência Artificial.

Como trabalhos futuros, pretende-se usar dados gerados a partir desta prova de conceito realizada no Bentham Obras. Para que se possa analisar a qualidade dos planejamentos através de algoritmos de aprendizagem de máquina. Contudo, o intuito não é substituir o conhecimento humano pelo conhecimento de máquina, e sim, analisar o que pode ser melhorado e o quanto é possível ampliar a capacidade humana de tomar decisões em ambientes tão incertos quanto o canteiro de obras.

Referências

- BALLARD, G.; HAMZEH, F.; TOMMELEIN, I. The last planner production workbook-improving reliability in planning and workflow. *Lean Construction Institute, San Francisco, California, USA, 81pp*, 01 2007. Citado na página 29.
- BALLARD, H. G. *The Last Planner System of Production Control*. Tese (Doutorado) — School of Civil Engineering Faculty of Engineering, University of Birmingham, Enschede, The Netherlands, 2000. Disponível em: <<https://www.leanconstruction.org/media/docs/ballard2000-dissertation.pdf>>. Acesso em: 01 jan. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 28, 45 e 49.
- BATISTA, I. et al. Bentham obras: Um sistema de gestão inteligente para a construção civil. In: *Anais Estendidos do XXV Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 109–113. ISSN 2596-1683. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/webmedia_estendido/article/view/8147>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 47.
- BRASIL. Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. dispõe sobre a estratégia nacional de disseminação do building information modelling institui o comitê gestor da estratégia do building information modelling. *Diário Oficial da União*, Poder Executivo, Brasília, DF, 23 ago. 2019. Seção 1, p. 2. Citado na página 25.
- BRASIL. Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020. estabelece a utilização do building information modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da estratégia nacional de disseminação do building information modelling- estratégia bimbr, instituída pelo decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. *Diário Oficial da União*, Poder Executivo, Brasília, DF, 02 abr. 2020. Seção 1, p. 5. Citado na página 26.
- DIAS, P. R. V. *Engenharia de Custos: metodologia de orçamentação para obras civis*. 4nd.. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. Citado na página 44.
- EASTMAN, C. *BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2018. ISBN 978-1119287537. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- FORBES, S. M. A. L. H. *Modern Construction Lean Project Delivery and Integrated Practices*. New York, NY, USA: CRC Press, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 24, 27 e 29.
- FREITAS, R.; BRAGA, R.; OLIVEIRA, C. Uma proposta para melhoria do planejamento e controle da produção em projetos de construção civil. In: *Anais da IX Escola Regional de Computação do Ceará, Maranhão e Piauí*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. p. 99–106. ISSN 0000-0000. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/ercemapi/article/view/17913>>. Citado na página 20.
- GOMES, F. et al. Girls, a gateway for interoperability of electronic health record in low-cost system : * interoperability between fhir and openehr standards. In: *2019 IEEE International Conference on E-health Networking, Application Services (HealthCom)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. Citado na página 21.

GONZÁLEZ, P. et al. Analysis of causes of delay and time performance in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 140, n. 1, p. 04013027, 2014. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0000721>>. Citado na página 18.

GONZALEZ, V.; ALARCON, L.; MUNDACA, F. Investigating the relationship between planning reliability and project performance. *Production Planning Control*, v. 19, p. 461–474, 07 2008. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 56.

HAJDU, M.; LUCKO, G.; SU, Y. Singularity functions for continuous precedence relations and nonlinear activity-time-production functions. *Automation in Construction*, v. 79, p. 31–38, 2017. ISSN 0926-5805. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580517300341>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 32 e 39.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. São Paulo: Pearson, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 32 e 47.

HOLM, L. *101 Case Studies in Construction Management*. New York, NY, USA: Routledge, 2019. Citado na página 18.

IBGE. *Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2018*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019. Acesso em: 10 jan 2021. Citado na página 17.

IBRAHIM, H. A. et al. Understanding the planner's role in lookahead construction planning. *Production Planning and Control: The Management of Operations*, v. 30, n. 4, 2019. Citado na página 43.

KOSKELA, L. *Application of the new production philosophy to construction*. [S.l.], 1992. v. 72. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

KOSKELA, L.; TZORTZOPOULOS, P. *Lean construction : core concepts and new frontiers*. Abingdon, Oxon New York, NY: Routledge, 2020. ISBN 978-0-429-20373-2. Citado na página 27.

KOUTROMANOS, I. *Fundamentals of Finite Element Analysis: Linear Finite Element Analysis*. Wiley, 2018. ISBN 9781119260080. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=0FU8DwAAQBAJ>>. Citado na página 46.

LEVY, S. M. *Project Management in Construction*. 7rd. ed. USA: McGraw-Hill Education, 2018. Citado na página 18.

LU, W.; LAI, C. C.; TSE, T. *BIM and big data for construction cost management*. Abingdon, Oxon: Routledge, 2019. ISBN 978-1-351-17232-5. Citado na página 25.

LUCKO, G.; MUKHERJEE, A. Temporal perspectives in construction simulation modeling. In: *2013 Winter Simulations Conference (WSC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3257–3268. Citado 3 vezes nas páginas 15, 32 e 39.

LUCKO, G.; SU, Y. Singularity functions as new tool for integrated project management. *Procedia Engineering*, v. 85, p. 339–350, 12 2014. Citado 3 vezes nas páginas 15, 32 e 39.

- MDIC. *BIM BR Construção Inteligente*. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/images/REPOSITORIO/sdci/CGMO/Livreto_Estrategia_BIM_BR_vers~ao_site_MDIC.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2020. Citado na página 26.
- MOURA, C. B.; FORMOSO, C. T. Análise quantitativa de indicadores de planejamento e controle da produção: impactos do Sistema Last Planner e fatores que afetam a sua eficácia. *Ambiente Construído*, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 9, n. 3, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 37.
- MUBARAK, S. *Construction Project Scheduling and Control*. 3rd. ed. USA: Wiley, 2015. Citado na página 26.
- NASCIMENTO, L. et al. Pixel, plataforma para integração de experimentos de interoperabilidade em sistemas legados de saúde pública. In: *Anais da VIII Escola Regional de Computação do Ceará, Maranhão e Piauí*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2020. p. 181–188. ISSN 0000-0000. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/ercemapi/article/view/11483>>. Citado na página 20.
- OLIVEIRA, M. et al. Revive negócio, uma plataforma para impulsionar ideias e startups no ecossistema de inovação do ceará. In: *Anais do VI Workshop sobre Aspectos Sociais, Humanos e Econômicos de Software*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. p. 31–40. ISSN 2763-874X. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/washes/article/view/15887>>. Citado na página 20.
- SAMAD, G. E.; HAMZEH, F.; EMDANAT, S. Last planner system – the need for new metrics. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 637–644. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 56.
- SEARS, S. *Construction project management : a practical guide to field construction management*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 9780471745884. Citado na página 18.
- SEARS, S.; CLOUGH, R.; SEARS, G. *Construction Project Management: A Practical Guide to Field Construction Management*. Wiley, 2008. ISBN 9780471745884. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=UtV-1OPZF_4C>. Citado na página 18.
- SHEHAB, L. et al. Singularity functions for early warning guidance in the last planner system ®. *Lean Construction Journal (LCJ)*, p. 76–90, 11 2019. Citado 6 vezes nas páginas 15, 32, 38, 43, 47 e 49.
- SILVA, P. H. d.; CRIPPA, J.; SCHEER, S. Bim 4d no planejamento de obras: detalhamento, benefícios e dificuldades. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 10, p. e019010, fev. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650258>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 38.
- SOP. *Obras de edificações*. 2022. Disponível em: <https://cearatransparente.ce.gov.br/portal-da-transparencia/obras/edificacoes?dae_status=+&data_fim_previsto=&data_inicio=&locale=pt-BR&municipio=&organ_id=+&search=&sort_column=&sort_direction=&__=__>. Acesso em: 03 mar 2022s. Citado na página 17.
- UNIÃO, T. de Contas da. *Auditoria operacional sobre obras paralisadas*. 2019. Disponível em: <<https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/auditoria-operacional-sobre-obras-paralisadas.htm>>. Citado na página 17.